TECHNICAL REPORTS OF THE METEOROLOGICAL RESEARCH INSTITUTE No.74

Development of a new pop-up ocean-bottom pressure gauge

BY

Kenji Hirata, Akira Yamazaki, and Hiroaki Tsushima

気象研究所技術報告
第 74 号

新型自己浮上式海底水圧計の開発

平田賢治，山崎明，対馬弘晃

気象研究所
METEOROLOGICAL RESEARCH INSTITUTE, JAPAN
October　2015

METEOROLOGICAL RESEARCH INSTITUTE

Established in 1946

Director-General: Dr. Masashi Nagata
Senior Director for Research Affairs: Dr. Masafumi Kamachi
Senior Director for Research Coordination: Mr. Yoshiaki Takeuchi

Forecast Research Department	Director: Dr. Kazuo Saito
Climate Research Department	Director: Dr. Tomoaki Ose
Typhoon Research Department	Director: Mr. Isao Takano
Atmospheric Environment and Applied Meteorology Research Department	Director: Dr. Izuru Takayabu
Meteorological Satellite and Observation System Research Department	Director: Dr. Satoru Tsunomura
Seismology and Tsunami Research Department	Director: Dr. Kenji Maeda
Volcanology Research Department	Director: Dr. Hitoshi Yamasato
Oceanography and Geochemistry Research Department	Director: Dr. Tsurane Kuragano

1-1 Nagamine, Tsukuba, Ibaraki, 305-0052 Japan

TECHNICAL REPORTS OF THE METEOROLOGICAL RESEARCH INSTITUTE

Editor-in-chief: Tomoaki Ose

Editors:	Wataru Mashiko	Masayoshi Ishii	Masahiro Sawada
	Makoto Deushi	Toshiharu Izumi	Kazuhiro Kimura
	Akimichi Takagi	Hideyuki Nakano	

Managing Editors: Sadao Saito, Keiko Ono

The *Technical Reports of the Meteorological Research Institute* has been issued at irregular intervals by the Meteorological Research Institute (MRI) since 1978 as a medium for the publication of technical report including methods, data and results of research, or comprehensive report compiled from published papers. The works described in the *Technical Reports of the MRI* have been performed as part of the research programs of MRI.

©2015 by the Meteorological Research Institute.

The copyright of reports in this journal belongs to the Meteorological Research Institute (MRI). Permission is granted to use figures, tables and short quotes from reports in this journal, provided that the source is acknowledged. Republication, reproduction, translation, and other uses of any extent of reports in this journal require written permission from the MRI.

In exception of this requirement, personal uses for research, study or educational purposes do not require permission from the MRI, provided that the source is acknowledged.

気象研究所技術報告　第74号　平成27年10月
TECHNICAL REPORTS OF THE METEOROLOGICAL
RESEARCH INSTITUTE No.74, October 2015
doi:10.11483/mritechrepo.74

Development of a new pop-up ocean-bottom pressure gauge

BY

Kenji Hirata[*1], Akira Yamazaki[*2], and Hiroaki Tsushima[*3]

[*1] Guest Researcher, Seismology and Tsunami Research Department, Meteorological Research Institute (until December 2012, in Seismology and Volcanology Research Department, Meteorological Research Institute; Present affiliation: National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention)
[*2] Kakioka Magnetic Observatory, Japan Meteorological Agency (until March 2014, in Seismology and Volcanology Research Department, Meteorological Research Institute)
[*3] Seismology and Tsunami Research Department, Meteorological Research Institute

新型自己浮上式海底水圧計の開発

平田賢治[*1]・山崎　明[*2]・対馬弘晃[*3]

[*1]気象研究所地震津波研究部客員研究員（2012 年 12 月まで気象研究所地震火山研究部、現在、防災科学技術研究所）
[*2]気象庁地磁気観測所（2014 年 3 月まで気象研究所地震火山研究部）
[*3]気象研究所地震津波研究部

序

地震火山研究部（当時）では、平成21年度から平成25年度にかけて、沖合津波観測データを活用した津波予測の精度向上を目的として、「沖合・沿岸津波観測等による津波の高精度予測に関する研究」と題した重点研究を実施した。この研究におけるテーマの一つとして、海底水圧計（津波計）で観測される水圧変動から津波による変動を抽出する精度を高めるため、地震動や海底地殻変動によって引き起こされる短周期の水圧変動の詳細を明らかにすることを掲げた。このテーマへの具体的取り組みとして、深海底における海底水圧変動をこれまでより高分解能でかつ短い周期帯まで観測可能とする新型の自己浮上式海底水圧計を開発することとした。本技術報告は、この新型の海底水圧計の開発研究について取りまとめたものである。

本開発研究を進めていた最中の平成23年３月11日には、「平成23年（2011年）東北地方太平洋沖地震」が発生し、それに伴う巨大津波によって東日本を中心に甚大な被害が発生した。このような甚大な被害を二度と生じさせないよう、様々な分野での取り組みが進められており、津波防災の分野においては、津波警報の改善、津波予測手法の高度化に加え、津波早期検知のための沖合津波観測の拡充が図られている。例えば気象庁はブイ式海底津波計を三陸沖に設置して平成24年12月から活用を開始し、防災科学技術研究所は北海道から関東地方の太平洋側沖合に約150観測点から成るこれまでにない高密度な日本海溝海底地震津波観測システムを整備中である。このような観測網における沖合津波観測は、海底水圧計を用いて行われており、海底水圧計の特性の詳細を把握することは極めて重要である。本開発研究を通じて得られた短周期の海底水圧計観測による水圧変動に関する知見は、津波早期検知とそれによる津波予測の迅速化・高精度化に大きく寄与するものである。

気象研究所では、平成26年４月に地震火山研究部を地震津波研究部及び火山研究部に改組し、津波研究については高度化する津波観測データを活用してより高精度な津波の高さ予測のための研究を促進するための体制を整えた。本開発研究で得られた成果が今後の津波研究の推進に結びつくことを期待したい。最後に、本開発研究の実施にあたり気象庁内外の多くの方々の御協力を頂いたことに感謝する。

平成27年1月

地震津波研究部長

前　田　憲　二

Abstract

Between 2010 and 2012, we developed a free-fall/pop-up ocean-bottom pressure gauge (OBPG) system that is able to measure pressure signals at high-sampling rates (up to 100 Hz) and with pressure resolution finer than that of existing OBPGs. Pressure measurement with this new OBPG makes us possible to extract information of pressure signals across a wide frequency range in which tsunami (～ one thousand to a few thousands seconds), acoustic water reverberations (～ a few seconds to more than ten seconds), and seismic wave (tens to hundreds of milliseconds) can be observed simultaneously. In 2013, a one-week trial observation was carried out on the seafloor at a depth of approximately 1100 m, at a location approximately 60 km southwest of Omaezaki Peninsula, Tokai region, central Japan, a site within several tens of meters from an existing Japan Meteorological Agency (JMA) cabled pressure gauge. Comparisons of observations made with the new OBPG and the existing JMA cabled pressure gauge indicate that the new OBPG functioned well and detected short-period pressure signals despite the existing JMA cabled pressure gauge could not detect those.

Abstract

Between 2010 and 2012, we developed a free-fall/pop-up ocean-bottom pressure gauge (OBPG) system that is able to measure pressure signals at high-sampling rates (up to 100 Hz) and with pressure resolution finer than that of existing OBPGs. Pressure measurement with this new OBPG makes us possible to extract information of pressure signals across a wide frequency range in which tsunami (～ one thousand to a few thousands seconds), acoustic water reverberations (～ a few seconds to more than ten seconds), and seismic wave (tens to hundreds of milliseconds) can be observed simultaneously. In 2013, a one-week trial observation was carried out on the seafloor at a depth of approximately 1100 m, at a location approximately 60 km southwest of Omaezaki Peninsula, Tokai region, central Japan, a site within several tens of meters from an existing Japan Meteorological Agency (JMA) cabled pressure gauge. Comparisons of observations made with the new OBPG and the existing JMA cabled pressure gauge indicate that the new OBPG functioned well and detected short-period pressure signals despite the existing JMA cabled pressure gauge could not detect those.

目　次

1．新型自己浮上式海底水圧計の開発の背景と必要性…… 1
2．新型自己浮上式海底水圧計の構成と仕様…… 4
3．遠州灘での試験観測
　－新型自己浮上式海底水圧計と気象庁東南海ケーブル式海底水圧計の比較－……11
4．まとめ……19

１．新型自己浮上式海底水圧計の開発の背景と必要性

気象庁の量的津波予測では、地震観測によって地震の震源位置とマグニチュードを推定し、あらかじめデータベースに収蔵された津波の計算結果の中から地震の震源位置とマグニチュードに対応する結果を引き出すことにより、沿岸部に到達するであろう津波を予測している（舘畑，1998）。地震観測に基づいて津波を予測しているので、例えば地震波から予想されるよりも大きな津波が発生する津波地震に対しては予測精度が低下する。沖合で直接津波をリアルタイム観測し、その情報を用いれば、より精度の高い津波の予測が可能である。また、沖合で津波を観測すると、ある程度の猶予時間も確保することができる。

わが国におけるリアルタイム津波観測は1980年頃より気象研究所が開発した東海沖ケーブル式海底水圧計によって初めておこなわれ（気象研究所地震火山研究部，1980）、それ以降も気象庁や大学、研究機関が設置したケーブル式海底水圧計（藤沢・他，1986; Kanazawa and Hasegawa, 1997; Momma *et al*., 1997; Eguchi *et al*., 1998; Hirata *et al*., 2002; 齋藤，2007）やケーブル式超音波計（永井・他，2002）によっておこなわれてきた。近年では GPS 波浪計を用いたリアルタイム沖合津波観測もおこなわれるようになってきた（河合・他，2011）。最近の技術開発により、測位誤差を引き起こす対流圏の影響の補正をより良くすることにより、100 km を超える離岸距離での GPS 測位の安定性を確保することができるようになった（寺田，2013）が、アウターライズ地震や津波地震のように海溝軸近傍に津波波源が限定されるような場合に対して、より長い猶予時間を確保するにはケーブル式の観測が有利である。

ケーブル式測器による海底水圧観測の初期の頃は、海底の観測点から1000 km 以上離れた地震に伴って発生した津波の観測事例等が蓄積され、海底水圧観測による津波の特徴や観測限界について論じられるなどしていた（例えば、Okada, 1995）。地震が遠くで発生した場合に、海底で水圧を観測していると、震源から伝播してきたレーリー波によって海底が上下に揺すられ、数十秒程度の周期の水圧変動を記録することも初めて明らかになった（Filloux *et al*., 1982; 岡田・磯崎，1984）。

しかし、平成15年（2003年）十勝沖地震（M_J 8.0）の際に、震源域極近傍に設置されたケーブル式海底水圧計で記録された水圧変化（松本・他，2005; Watanabe *et al*., 2004）は，上述のレーリー波起源の短周期水圧変化に比べて、周期が数秒と一桁短く，かつ何桁も大きな振幅を持っていた。この水圧変動の正体は地震時の海底面上下変動が圧縮性流体の運動に比べて十分早く起きたために生じた音響波と考えられ、Kajiura（1970）によって理論的に予想されていたが、2003年十勝沖地震の海底水圧観測によってその存在が初めて確かめられた。短周期かつ大振幅の海底水圧変動は平成23年（2011年）東北地方太平洋沖地震でも観測されており、同地震の場合は約0.8 MPa（水柱高さ換算で約80 mH_2O）の振幅、周期10秒程度の水圧変動が観測されている（Tsushima *et al*., 2011）。

津波に比べて短周期の水圧変動は上述の音響波よりももっと短周期の周波数帯域でも観測される。Hoshiba and Iwakiri（2011）によれば、東北地方太平洋沖地震の震央から百数十 km 離れた、震源に最も近い陸上地震観測点の強震動記録の上下動加速度成分は片振幅で最大 2 m/sec^2を示した。また、加速度パワースペクトルは、低周波数領域から、A/D 変換直前のローパス・フィルターのカットオフ周波数である30 Hz 程度までフラットな加速度レベルを示している。したがって、同地震では30 Hz 以上の高周波数領域でも数 m/sec^2の大きな加速度レベルを有していたが、地震計測システムの計測限界によって30 Hz 程度までの地震動しか計測できなかった可能性がある。震源直近の地震観測点でそのような大きな加速度が観測されていたならば、震源域近傍の海底でも同等レベルの加速度で海底面が上下に揺すられ、その結果、短周期の水圧変動として観測されるはずである。一般に、水深 H の平坦な海底面が地震動によって加速度 a で鉛直方向に揺すられた場合、海底の水圧

変動pは以下の式のように表される。

$$p = \rho a h$$

ここで、ρは海水の密度で、海水は非圧縮性流体と仮定している。仮に水深Hを2000 m（ケーブル式海底水圧計の設置水深は900–5000 m 程度）、海水の密度ρを1.0 g/cm^3（＝10^3 kg/m^3）とすると、数10 Hz で 1 m/sec^{2}の地動上下加速度aが海底で観測された場合、この海底の揺れに伴って発生した海底水圧変化は約 2 MPa、水柱高さ換算で200 mH_2O もの短周期の海底水圧変動が観測されることになる。沖合の津波の振幅はM8クラスの地震の場合でたかだか数10 cm、M9クラスの東北地方太平洋沖地震の場合でも数 m であり、水柱高さ換算で数百 mH_2O の振幅はそれらより 2 桁以上大きい。

図 1 及び表 1 に、国内外の大学・研究機関が設置した海底水圧計で観測された津波・音響波・地震波の水柱高さ換算の振幅と周期の概略の関係を示す（Hirata（2011）を改変）。数10秒よりも長い周期帯には「海洋内部重力波（infra-gravity wave）」と呼ばれる水圧変動が存在することが知られている（Crawford *et al.*, 1991）が、津波や音響波の振幅に比べてやや小さいので、この図には表示していない。

現在のわが国周辺のケーブル式海底水圧計はいずれも、水晶発振器の共振周波数が外部から水晶発振器に加わる圧力によって変化する性質を利用し、感圧水晶の共振周波数変化を測定することにより海底圧力を計測している。気象庁の東南海ケーブル式海底水圧計等の場合、感圧水晶発振器からの振動数（カウンタ数）と振動数を測定した時間の長さ（クロック数）を0.1秒パケット単位で収録している。0.1秒パケットとして収録されたカウンタ数とクロック数から発振周波数が求まり、その発振周波数から最終的に計算される水圧データは10 Hz サンプリングの時系列データに相当する。同じサンプリング間隔で収録する圧力分解能は各ケーブルシステムによって異なる。図 1 の青色の破線は、2008年に気象庁が東海地域の海底に設置した東南海ケーブル式海底水圧計（齋藤，2007）の圧力分解能と周期の関係を示しており、10 Hz（0.1秒）サンプリングの場合 Nyquist 周波数の 5 Hz（0.2秒）よりも低い周波数帯の水圧変動現象（図 1 の黄色の領域）を計測することができる。その場合の圧力分解能の理論値は約 1 cmH_2O（100 Pa）である。ただし、例えば0.4秒周期の信号を0.1秒のサンプリング間隔で表現してもかなり粗い近似にしかならない。実際には、真の信号の立ち上がりやピークの位相を 1 周期の数%未満で表現することが必要と考えられる。どの程度の精度で位相を表現するのが適当かは一意には定まらないが、ここでは0.1秒のサンプリング間隔では周期 2 秒よりも長い周期の現象がよく再現することができると考える（図 1 の「20Δt」は0.1秒サンプリング間隔の20倍の意味）。同様に、振幅についても量子化に伴う誤差を両振幅の 5 %未満に抑えられれば、すなわち圧力分解能の20倍以上の両振幅の現象ならばよく再現されているとここでは考える（図 1 の「10Δp」は、信号の両振幅が約 1 cmH_2O の圧力分解能の20倍に相当するライン。図 1 の縦軸は信号の片振幅で記述されていることに注意されたい）。

しかし、例えば2011年東北地方太平洋沖地震の場合のように、ケーブル式海底水圧計の Nyquist 周波数の 5 Hz よりも高い周波数成分が地震動に相当程度含まれている場合（Hoshiba and Iwakiri, 2011）、エイリアシングによって Nyquist 周波数よりも高い周波数帯域の信号成分が折り返して、津波などの低周波数帯域に重畳してしまい、真の水圧変動がマスクされ正しく計測されない可能性がある。このような現象は、実際上は、震源域近傍あるいは震央距離数百 km 以内で観測される津波の水圧変動の初期部分にその影響が強く現れると予想される。

0.1秒パケット単位のカウンタ数とクロック数を10パケット分だけ積算し水圧を計算すれば、圧力分解能は10倍良くなり約 1 mH_2O に向上する。この操作は、生の計測データに 1 秒幅の移動平均フィルター（moving, block mean filter）をかけて 1 秒間隔でリサンプルすることと等価と考えられる。 1 秒幅の移動平均フィルター

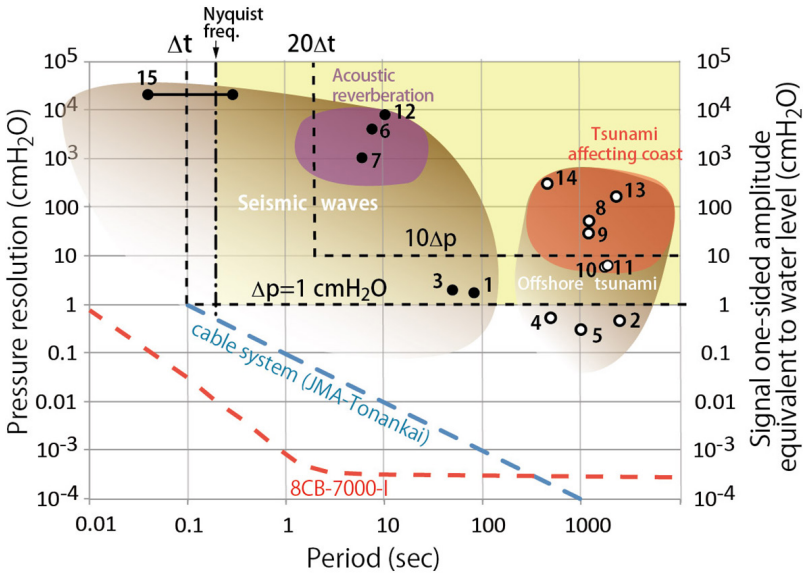

Fig. 1 Amplitudes and principal periods of tsunami, acoustic reverberations, and seismic waves observed with ocean-bottom pressure gauges (OBPGs), modified from Hirata (2011). The unit 1 cmH_2O is equivalent to 100 Pa. Observations are listed in data, Table 1. Open circles (○), offshore tsunami; solid circles (●), acoustic reverberations and seismic waves. Colored areas indicate amplitude-period extents for phenomena observed with OBPGs: offshore tsunamis and seismic waves (brown), acoustic reverberations (purple), and severe offshore tsunamis affecting coasts (orange).

図 1　海底水圧計で観測される津波、音響波、地震波の水柱高さ換算の振幅と周期の関係（Hirata（2011）を一部改変）。1 cmH_2O は100 Pa に相当する。図中のシンボルは、実際に海底水圧計などで観測された津波（○）、音響波あるいは地震波（●）を表しており、数字は表 1 の番号に対応している。これらの観測事例に基づき、沖合津波や地震波（焦げ茶色）、音響波（紫色）、そして沿岸に影響を及ぼすことが予想される沖合津波（オレンジ色）が海底水圧計によって観測され得るであろう範囲をそれぞれ図中に示した。青破線は東南海ケーブル式海底水圧計の圧力分解能、赤破線は新型海底水圧計に採用した水圧センサ8CB-7000-I の圧力分解能（カタログ値）を示す。

Table 1　Amplitudes and principal periods of offshore tsunamis, acoustic reverberations, and seismic waves observed with OBPGs
表 1　海底水圧計で観測された沖合津波、音響波、地震波の振幅と主要な周期

No.	Events	M	Station		Observation			Epicenter-to-station distance (km)	References
			station code	water depth (m)	Type	Amplitude[*1] (cm)	Period (sec)		
1	1979/3/14 Gulf of California	Ms7.6	P	3210	seismic wave	1.75	～78.8	981	Filloux (1982)
2	1979/3/14 Gulf of California	Ms7.6	P	3210	tsunami	0.45	～2640	981	Filloux (1982)
3	1990/4/5 Mariana	Ms7.5	BS1	4011	seismic waves	2	～50	2300	Okada (1995)
4	1990/4/5 Mariana	Ms7.5	BS1	4011	tsunami	0.5	～500	2300	Okada (1995)
5	2000/1/28 Kuril	Mw6.8	PG2	2248	tsunami	0.3	～960	190	Hirata *et al.* (2003)
6	2003/9/25 Tokachi	Mw8.0	PG1	2218	acoustic reverbration	4000	7.6	31	Li *et al.* (2008)
7	2003/9/25 Tokachi	Mw8.0	PG2	2210	acoustic reverbration	1000	～6	82	Matsumoto *et al.* (2005)
8	2003/9/25 Tokachi	Mw8.0	PG1	2218	tsunami	50	～1200	31	Hirata and Baba (2004)
9	2003/9/25 Tokachi	Mw8.0	PG2	2210	tsunami	30	～1200	82	Hirata and Baba (2004)
10	2003/9/25 Tokachi	Mw8.0	TM1	1618	tsunami	6	～1900	309	Hino *et al.* (2005)
11	2003/9/25 Tokachi	Mw8.0	TM2	1013	tsunami	6.5	～2000	318	Hino *et al.* (2005)
12	2011/3/11 Tohoku	Mw9.0	TM1	1618	acoustic reverbration	8000	～10	138	Tsushima *et al.* (2011)
13	2011/3/11 Tohoku	Mw9.0	TM1	1618	tsunami (fundamental)	180	～2400	138	Tsushima *et al.* (2011)
14	2011/3/11 Tohoku	Mw9.0	TM1	1618	tsunami (spike)	300	～480	138	Tsushima *et al.* (2011)
15	2011/3/11 Tohoku	Mw9.0	MYGH12[*2]	0[*2]	seismic waves	20000[*2]	0.04～0.3[*2]	145	Hoshiba and Iwakiri (2011)

[*1] Amplitude equivalent to water level. [*2] The values were measured with a seismometer on land surface.

のカットオフ周波数（振幅が0.707倍（－3 dB）となる周波数）は0.443 Hz（約2.2秒）であり、移動平均フィルターのロールオフ特性が－6 dB/oct であることを考えれば、数 Hz から数10 Hz の地震波の周波数帯域の信号をまだ十分低減することができない。したがって、元の地震波の振幅が十分大きければ 1 秒幅の移動平均フィルターを掛けてもその周波数帯域の地震波は残存してしまう。サンプリング操作によって一度エイリアシングが発生してしまえば、数 Hz から数10 Hz に残存した信号成分が対象とする現象の周波数帯域に折り返してしまい、対象とする現象が歪められると同時に、一度折り返して重畳したエイリアシング成分は決して除去することはできなくなる。

このような問題を克服し、津波あるいは音響波の信号をより正確に計測するためには、現在のケーブル式海底水圧計よりも、もっと高い周波数でサンプリングでき、かつ、もっと細かい圧力分解能を有する観測をおこなえば良い。このような観測を可能とするために、気象研究所では、新型の自己浮上式海底水圧計を平成22年度から平成24年度（2010年度から2012年度）の 3 カ年かけて試作し、平成25年度に実海域試験をおこなった。本小論ではその概要について報告する。

2．新型自己浮上式海底水圧計の構成と仕様

新型自己浮上式海底水圧計には、米国 Paroscientific Inc. 社製のインテリジェントタイプの圧力センサ 8CB-7000-I を水圧センサとして採用することとした。カタログ情報によれば、この水圧センサは、(1) 従来のわが国周辺に展開されたケーブル式海底水圧計（Hewlett-Packard 社製の水圧センサを使用）で採用されている 10 Hz サンプリングよりも速い（最高で 1 kHz）サンプリングが可能であり、(2) その圧力筐体内部に CPU、メモリなど演算処理回路を持ち、水圧センサ内部で統計演算処理（Paroscientific 社では“Nano-resolution technology”と呼称している処理）をおこなうことによって、同じサンプリング間隔のデータで比較した場合、従来の同社製の水圧センサに比べて 2 桁以上細かい計測分解能で水圧を計測することができる。同社製の水晶発振器の共振周波数出力タイプの水圧センサを用いて、東北大学が開発した自己浮上式海底水圧計あるいは千葉大学が開発した自己浮上式海底地震計・水圧計では、それぞれ60秒間のサンプリング間隔（正確には、水晶発振器の発振周波数の積分時間60秒間）で0.07 mmH_2O（Hino *et al.*, 2009, 2014; 日野，私信）あるいは約30秒のサンプリング間隔で 1 mmH_2O の計測分解能（佐藤・他，2011）を達成しているが、同じサンプリング周期でみると8CB-7000-I の計測分解能は25倍あるいは350倍細かい。

図 1 の赤色の破線は、8CB-7000-I の圧力分解能（カタログ値）を示している（Paroscientific Inc., 2010）。同じサンプリング周期で比較すると、8CB-7000-I の圧力分解能は、気象庁の東南海ケーブル式海底水圧計の圧力分解能と比べて、サンプリング周期0.1秒で1/30程度、1 秒で1/100程度、細かい。この水圧センサを海底水圧計に採用すれば、現状のケーブル式海底水圧計のサンプリング周期0.1秒かつ圧力分解能 1 cmH_2O（100 Pa）という観測ウィンドウの下限をさらに拡張することが可能になると期待される。

新型自己浮上式海底水圧計を開発するにあたり、ガラス球やトランスポンダなど共通化できる部分が多いことなどから、気象研究所が所有する(株)東京測振製の自己浮上式海底地震計 TOBS-24N を改造することとした。今回試作した気象研の新型自己浮上式海底水圧計の構成図を図 2 に、主要な仕様を表 2 に示す。図 2 の、破線の灰色枠内の部分を今回新たに試作あるいは改造した。それ以外の部分は既存の TOBS-24N の部品をそのまま使用した。

TOBS-24N からの主な変更箇所を以下に列挙する。

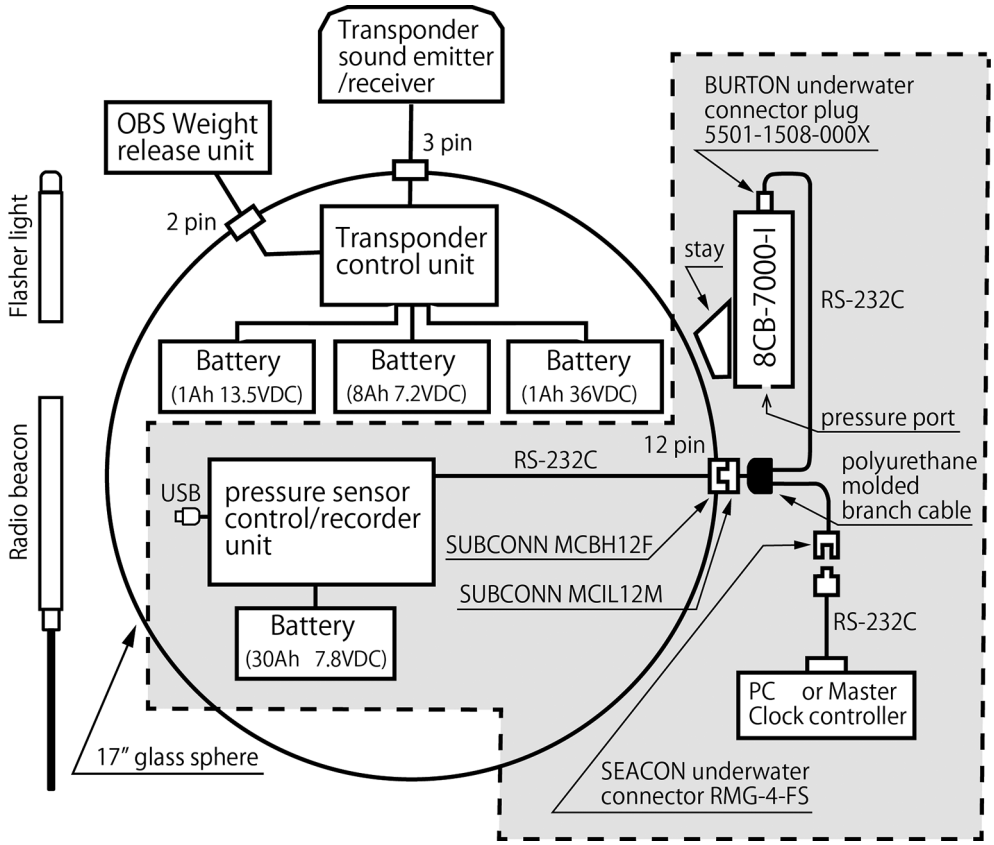

Fig. 2 Block diagram of the newly developed, Meteorological Research Institute (MRI) free-fall/pop-up OBPG based on an existing MRI pop-up ocean-bottom seismometer (Tokyo Sokushin, Inc.). Gray area bounded by the dashed line indicates converted or newly developed units. Units outside the gray area are unchanged from the existing MRI seismometer implementation.

図 2　試作した気象研の新型自己浮上式海底水圧計の構成図。気象研が所有している(株)東京測振製の自己浮上式海底地震計 TOBS-24N を改造した。破線で囲まれた灰色部分が今回新たに試作・改造した部分。破線で囲まれた灰色部分以外の部分は、TOBS-24N のものをそのまま使用。

(1) 水圧センサ8CB-7000-I 用の制御収録装置の試作（写真 1 ）。

水圧センサ8CB-7000-I 用の制御収録装置を試作し、地震計とハイドロフォンの双方の計測データを収録する制御収録装置の代わりに、ガラス球内部に取付けた。地震計とハイドロフォンからの信号はアナログ信号であり、既存の TOBS-24N の制御収録装置にはプリアンプと A/D 変換装置などが内蔵されていたが、水圧センサ8CB-7000-I の通信制御は RS-232C シリアル通信でおこなわれるため、試作した水圧センサ用の制御収録装置ではプリアンプと A/D 変換装置は不要になった。また、水圧センサ自身は最高で 1 kHz サンプリングが可能であるが、今回試作した制御収録装置は最高で100 Hz（10 msec）サンプリングで水圧データが計測可能な仕様とした。

(2) ハイドロフォンと外部通信制御兼用の10 pin 水中コネクタを、SUBCONN 社製12 pin 水中コネクタに変更。

変更後の SUBCONN 社製12 pin 水中コネクタを経由する信号線や、他の装置との配線図を図 3 に示す。SUBCONN 社製12 pin 水中コネクタの12芯のうち、 4 芯は水圧センサ8CB-7000-I との RS-232C 通信制御に用いられる。もう 4 芯は PC との通信制御あるいは東京測振製の GPS クロック TMC-8200との通信制御の双方に用いられる。残り 4 芯は現在使用していないが、もしも水圧センサとの通信制御を RS-485経由でおこなう必要が生じた場合などに使用できる。

Table 2　Specifications of the newly developed MRI pop-up OBPG
表 2　新型自己浮上式海底水圧計の仕様

MRI pop-up ocean-bottom pressure gauge
（1）耐圧ガラス球
寸法：外径17インチ　内径15.9インチ　　耐圧水深：最大6,700 m
コネクタ類：12 pin × 1 （水圧計記録制御／外部通信制御）
3 pin × 1 （音響トランスポンダ送受波器接続用）
2 pin × 1 （切り離し装置接続用）
バキュームポート× 1　　ハードハット：H22インチ×W22インチ×H19インチ
（2）電源（最長で 6 ヶ月間の観測が可能）
制御収録部用電池：OBB-24N-16型（30 Ah/3.9 V リチウム電池セル 2 直列×10組； 6 ヶ月間の観測）
水圧センサ用電池：制御収録部用電池と共用
トランスポンダ用電池：L-G2BA 型（12ヶ月仕様）
（※ 3 ヶ月観測仕様の短期型 OBS は、L-G2BA 型（ 5 ヶ月仕様））
（3）水圧センサ：Paroscientific 8CB-7000-I（インテリジェント・タイプ）
圧力測定範囲：水深換算で 0 m（大気圧）〜約7000 m
圧力測定精度：フルスケールの0.01%以下
圧力／温度分解能および計測データの必要表示桁数：（表 3 ）
入出力信号インターフェース：RS-232C（水圧センサとしては他に RS-485にも対応）
入力電圧：最小 + 6 VDC 〜 +16 VDC
消費電力：待機時16.5 mA　　最大32 mA @+ 6 VDC
温度感度： 1 度の温度変化に対して、フルスケールの0.0008%未満
耐圧筐体：ステンレス　　直径：5.51 cm　長さ：27.5 cm
耐圧深度：約8400 m
空中重力：1.33 kg
（4）制御収録部
水圧センサとの入出力信号インターフェース：RS-232C（通信速度115200 bps を推奨）
収録データタイプ：テキストデータ
データ収録間隔：10 msec 単位で設定
記録媒体：320 GB　HDD
収録データ読み出し方法：USB 接続によるデータ読み出し
消費電力：0.1 W 以内
（5）音響トランスポンダ
受信チャンネル：3 ch　　受信周波数：8.0-11.0 kHz　　送信周波数：8.3-10.7 kHz
（6）ラジオビーコン
空中線電力：0.1-0.2 W　　送信周波数：41-44 MHz　　電波形式：A1　　有効距離：20 km
（7）フラッシュライト
発光間隔： 2 秒　　発光形式：キセノンガス放電　　電力：0.1 J
（8）切り離し装置：電蝕式（ 1 カ所で電蝕）
（9）錘兼架台
寸法：L 65 cm × W 65 cm × H 25 cm　　空中重量：約35 kg　　水中重量：30.8 kg（重量は錘 2 式含む）

（3）17インチのガラス球に据え付けられた SUBCONN 社製12 pin 水中コネクタ・レセプタクル（MCBH12F）に、外側から接続する二股分岐ケーブルの製作（写真 2 ）。

今回開発した新型海底水圧計専用に、二股分岐ケーブルを特別に製作した。二股分岐ケーブルの 3 本は半田付けで接合し、新たに設計したモールド用の金型に固定した上、ポリウレタンコンパウンドを金型に注ぎ込み、コンパウンドを硬化させて製作した。次に二股分岐ケーブルの親側ケーブルには SUBCONN 社製12 pin 水中コネクタ・プラグ（MCIL12M）を、子側ケーブルの 2 本のうち、 1 本には BURTON 社製水中コネクタ・レセプタクルを、もう 1 本には SEACON 社製水中コネクタ・レセプタクルをモールドした。

試作した二股ポリウレタンモールドケーブルは耐水圧検査をおこなった。検査の概要は以下のとおり。①15分かけて0.1 MPa から29.4 MPa（水深3000 m 相当）まで加圧後、②29.4 MPa の水圧を 2 時間保持し、

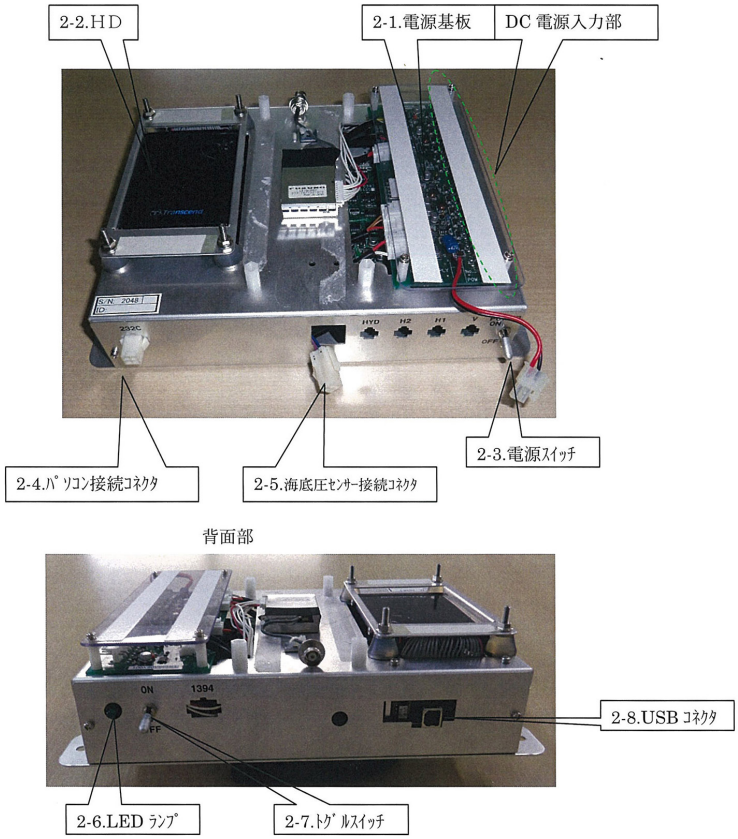

Photo 1　Pressure sensor control/recording unit, newly developed in this study.

写真 1　試作した制御収録部。写真中の説明の「2-X ○○○○○」の「2-X」は新型自己浮上式海底水圧計制御収録装置の取扱説明書（東京測振，2013）の章番号に対応する。「2-4. パソコン接続コネクタ」と「2-5. 海底圧センサー接続コネクタ」は、RS-232C 通信ケーブルで、17インチガラス球に取り付けられた SUBCONN MCBH12F レセプタクルに接続される。

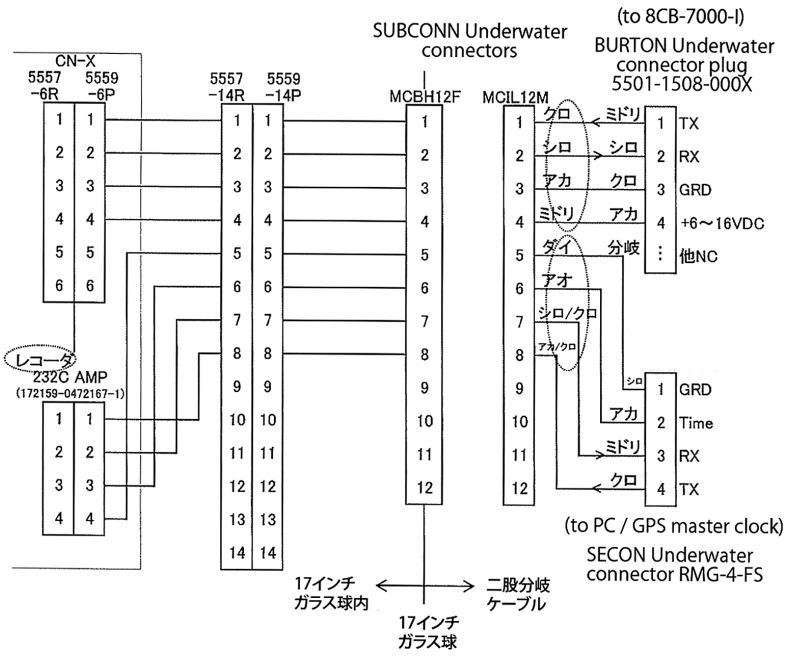

Fig. 3　Wiring/cabling diagram for connection of the pressure sensor control/recording unit, housed within a 17-inch (43.2 cm) glass sphere, and the PC/GPS master clock.

図 3　ガラス球内部の制御収録装置、水圧センサ、PC/GPS マスタークロックとの配線図。

Photo 2　Branching cable junction made of molded black polyurethane.
写真 2　二股分岐ケーブルの黒色のポリウレタンモールド部。

③15分かけて0.1 MPa まで減圧する試験を実施。その後、④ケーブル導通試験、ピンの間の絶縁抵抗試験、外観異常や水漏れが起きていないかの外観チェックをおこない、異常のないことを確認した。この二股ケーブルを介して、それぞれ図 2 のように、制御収録装置、水圧センサ、PC/GPS マスタークロックとの通信制御がおこなわれる。

(4) 水圧センサ8CB-7000-I をガラス球を覆うハードハットに固定するためのステンレス製の据え具（ステー）の製作。

8CB-7000-I は空中重量で 1 kg 以上あり、海中落下時／回収時／海底着底時の脱落防止のため、専用の治具を製作した。

新型自己浮上式海底水圧計の開発は平成22年度から平成24年度（2010年度から2012年度）の 3 カ年かけて段階的におこなわれた。平成22年度は水圧センサのカタログ調査と導入、平成23年度は制御収録部の試作および、制御収録部の陸上試験（約半年間の試験）、平成24年度はケーブル・コネクタ類と水圧センサの治具の製作、制御収録部のファームウェアの改良、そして新型自己浮上式海底水圧計の組立をそれぞれ実施した。写真 3 は完成した新型自己浮上式海底水圧計の試作機の外観である。

新型自己浮上式海底水圧計の観測にあたって事前設定が必要な計測モード及び計測パラメータについて述べる。なお、制御収録装置の操作方法の詳細については同装置の取扱説明書（東京測振，2013）、本研究では水圧センサ8CB-7000-I そのものの開発は行っていないため、同水圧センサの計測パラメータの詳細並びに圧力等の測定原理については水圧センサ8CB-7000-I の取扱説明書（Paroscientific Inc., 2010）をそれぞれ参照されたい。

ｉ）計測モード：KP0/KP1/KP2

水晶発振器の発振周波数は圧力と温度の両方の影響を受けて変化する。そのため、正確な圧力値を得るには温度補正を行う必要がある。水圧センサ8CB-7000-I は温度補正のため圧力筐体内部の温度を温度測定用の水晶発振器で測定しており、圧力筐体内部の演算回路で温度補正された圧力値と、それに用いた温度値を外部からの制御コマンドによってテキスト出力する機能を備えている。本研究で開発した制御収録装置は、水圧センサに対して、Paroscientific 社が定義した圧力計測及び温度計測のための制御コマンドを送信し、その出力（圧力値、温度値）に時刻スタンプを付加した上で電子記録媒体に収録する機能を有する。

圧力及び温度を計測するための具体的な制御方法としては 3 種類あり、それぞれ KP0、KP1、KP2という

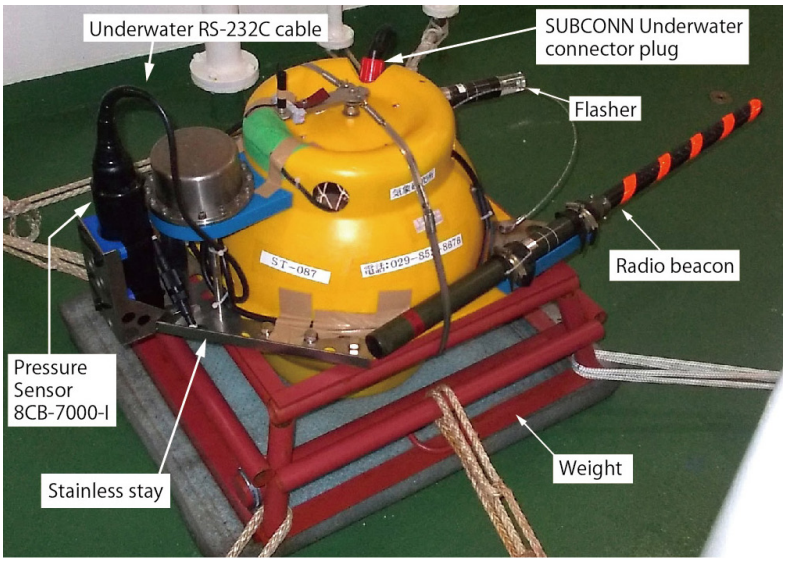

Photo 3　Newly developed pop-up OBPG.
写真 3　新型自己浮上式海底水圧計の試作機の外観。

計測モードが用意されている。KP0は、水圧センサ8CB-7000-I をそれ自身に備わった連続データ計測モードで作動させる場合に使用する。この場合、制御収録装置から水圧センサへ与える計測制御コマンド、例えば「KP_0_XX_06000」というコマンド行が制御収録装置から水圧センサへ 1 回だけ発行される。ここで、「XX」は Paroscientific 社が定義した制御コマンドのうち連続測定コマンド（P2, P4, Q2, Q4）のいずれかを、「_」は半角スペースを意味し、P2、P4、Q2、Q4はそれぞれ圧力測定周期（感圧水晶発振器の発振周波数の測定時間の長さ）、圧力、温度測定周期（感温水晶発振器の発振周波数の測定時間の長さ）、温度のいずれかを連続計測するためのコマンドである。KP0計測モードでは、連続データ計測動作は水圧センサ8CB-7000-I の圧力筐体内部に装備されたクロックによって管理される。連続測定コマンドの詳細は水圧センサ8CB-7000-I の取扱説明書（Paroscientific Inc., 2010）を参照されたい。

KP1は、圧力値のみを計測する計測モードであり、Paroscientific 社が定義した P3コマンド（圧力を 1 回だけ測定する命令）を、制御収録装置に内蔵されたクロックで管理された一定の時間間隔で、水圧センサ8CB-7000-I に繰り返し送信することにより、水圧センサで圧力計測動作がおこなわれる。

KP2は、圧力値及び温度値を同時に計測するモードであり、Paroscientific 社が定義した P3コマンドと Q3コマンド（温度を 1 回だけ測定する命令）を交互に、制御収録装置に内蔵されたクロックで管理された一定の時間間隔で、水圧センサ8CB-7000-I に繰り返し送信することにより、圧力計測と温度計測がおこなわれる。

KP0、KP1、KP2、どの計測モードにおいても、後述する制御パラメータ PI で圧力値および温度値の計測分解能が規定される。

ii）圧力値の「計測積分時間」（Pressure measurement integration time）: PI

後述する制御パラメータ XM ＝ 0 の場合は、感圧水晶発振器のカウンタ数を積分する時間の長さ（msec）。XM ＝ 1 あるいは XM ＝ 2 の場合は、PI で指定される時間は、水圧センサから計測データが出力（報告）される時間間隔（data reporting interval）を意味する。なお、PI が変更されると感温水晶発振器の積分時間（TI）も、自動的に PI と同じ値に変更される（Paroscientific Inc., 2010）。

iii）カットオフ周波数：IA

IIR フィルター（XM ＝ 1 ）モードにおけるカットオフ周波数の設定。表 3 を参照されたい。

Table 3　Pressure/temperature measurement resolution of the 8CB-7000-I depth sensor
表 3　圧力センサ8CB-7000-I の圧力 / 温度分解能[*1]

IA	Cut-off frequency (Hz)[*2]	Recommended, minimum sampling interval (msec)[*3]	Pressure/temperature measurement resolution	Pressure/temperature digits
1	700	1	200 ppm	7
2	350	2	56 ppm	7
3	175	3	14 ppm	8
4	88	6	4.5 ppm	8
5	44	11	1.0 ppm	8
6	22	22	0.35 ppm	9
7	11	44	0.14 ppm	9
8	5.5	89	45 ppb	10
9	2.8	178	14 ppb	10
10	1.4	350	4.5 ppb	11
11	0.7	700	1.6 ppb	11
12	0.35	1400	0.7 ppb	12
13	0.18	2800	0.5 ppb	12
14	0.09	5600	0.4 ppb	12
15	0.045	11200	0.4 ppb	12
16	0.023	22400	0.4 ppb	12

[*1] Pressure/temperature resolution during IIR-filter measurement mode.
ローパス IIR フィルター計測モード時の圧力 / 温度分解能
[*2] Cut-off frequency is defined the -3 dB point of the IIR-filter.
カットオフ周波数は IIR フィルターレスポンスが -3 dB となる周波数。
[*3] Recommended, minimum sampling intervals that are satisfied the sampling theorem.
サンプリング定理を満たす最小サンプリング間隔の推奨値。

ⅳ）コマンド待機時の挙動：FM（Fetch Mode）

計測動作をトリガーモードでおこなう（Trigger: FM ＝ 0 ）か、フェッチモード、すなわち常時、バックグラウンドでおこなう（Fetch: FM ＝ 1 ）かの指定。従来の Paroscientific 社インテリジェント水圧センサはトリガーモードで計測していた。

ⅴ）積分の実行タイミング：OI（Simultaneous Integration or Sequential Integration Simulation）

圧力値及び温度値を計測する際に、各物理量の積分を同じタイミングで実行するか（OI ＝ 0 ）、交互に実行するか（OI ＝ 1 ）の指定。なお、最近のマイクロプロセッサ技術の進展により、OI ＝ 1 でも感圧水晶発振器と感温水晶発振器からのカウンタ数の積分そのものは同時におこなわれ、おのおのの出力タイミングを交互にずらして計測している。

ⅵ）デジタルフィルターの型：XM（Resolution Mode）

統計演算処理（Nano-resolution）モードにおけるフィルターの型の設定。XM ＝ 1 なら IIR フィルター、XM ＝ 2 なら FIR フィルター。なお、XM ＝ 0 は統計演算処理をおこなわない従来の計測モード。

ⅶ）計測値の桁数：XN（Numeric digits）

計測時の数値の桁数。XN ＝ 0 を指定すると、デフォルト値すなわち表 3 最右列記載の桁数（各 IA での計測に必要な桁数）に設定される。

ⅷ）圧力値の単位：UN（pressure engineering units）

計測時の圧力の単位。psi（UN ＝ 1 ）、hPa（UN ＝ 2 ）、MPa（UN ＝ 5 ）など。

3．遠州灘での試験観測
－新型自己浮上式海底水圧計と気象庁東南海ケーブル式海底水圧計の比較－

開発した新型自己浮上式海底水圧計の性能について、高圧の海底下の環境で実際に水圧が測定できるか、計測システムが正常に動作するかなどを含め、総合的に評価するため、実海域での試験観測を実施した。試験海域としては遠州灘を選定した。遠州灘には気象庁のケーブル式海底水圧計が設置されており、その記録と比較することができるからである（図 4 ）。

遠州灘での新型自己浮上式海底水圧計の設置と回収は、気象庁の海洋気象観測船「凌風丸」を用いて2013年に潮岬南方沖で実施した海底地震観測の回収航海（航海名：RF-1308）に併せておこなった。乗船者等を表 4 に示す。新型自己浮上式海底水圧計は、2013年 9 月26日に設置し、10月 3 日に回収した。

新型自己浮上式海底水圧計の設置位置は御前崎の南西沖約60 km で、音響通信による三点測量で求めた値は北緯34度13.051分、東経137度41.454分、水深1116 m である（図 4 中の pOBPG）。この地点は、東南海ケーブル式海底水圧計 TNK3（北緯34度13.04分、東経137度41.52分、水深1103 m）から西北西に約100 m 離れた位置にあたる。水圧計の観測パラメータは、圧力と温度の両方を計測する KP2モード、サンプリング周波数を100

Table 4　Researchers and engineers who participated in the research cruise RF-1308
表 4　RF-1308の OBS、OBPG 関係の乗船者

航海日：2013年 9 月25日～10月 7 日
航海名：RF-1308
船　舶：気象庁地球環境・海洋部　凌風丸
乗船者：山崎　明・対馬弘晃（気象研究所）、馬場久紀（東海大学）、
松原忠泰（東京測振）、井澤　絢・野本博之（勝島製作所）

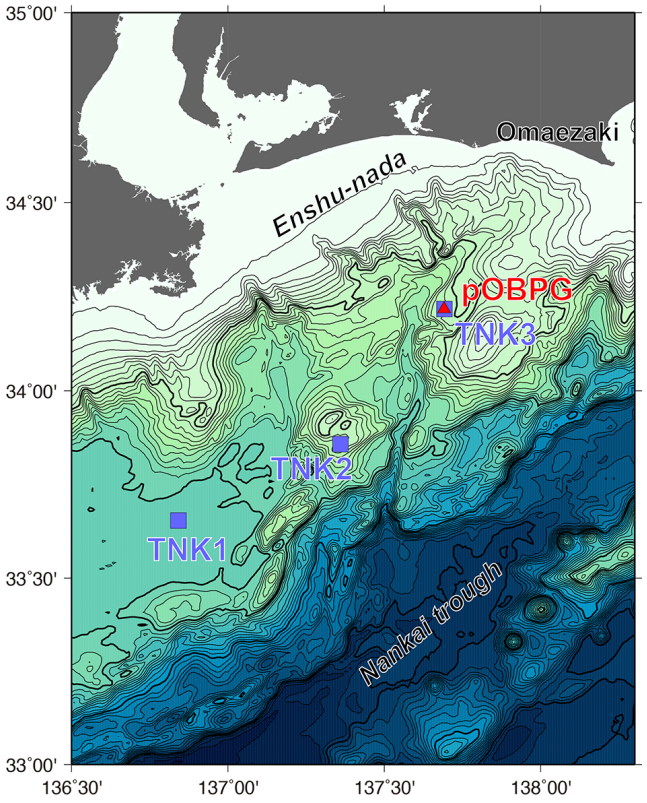

Fig. 4　Location of the newly developed pop-up OBPG (red triangle) in the trial observation, and cabled OBPGs (blue squares). Contour lines indicate isobaths at 100 m intervals. Water depths at the sensors are 1116 m (pOBPG), 2050 m (TNK1), 1120 m (TNK2), and 1103 m (TNK3).

図 4　新型自己浮上式海底水圧計とケーブル式海底水圧計の位置。赤い三角印（pOBPG）が新型自己浮上式海底水圧計、青い四角印（TNK1～3）がケーブル式海底水圧計の位置を示す。等値線は水深を示し、100 m 間隔。各海底水圧計の設置地点の水深は、pOBPG が1116 m、TNK1が2050 m、TNK2が1120 m、TNK3が1103 m。

Table 5　Measurement parameters for the newly developed OBPG during deep-ocean pressure observations
表 5　実海域観測における各計測パラメータの設定値

パラメータ名	設定値	備考
計測モード	KP2	圧力及び温度の計測
サンプリング周期	10	10 msec（100 Hz）サンプリング
PI	1	水圧センサからの計測データ報告時間間隔 1 msec
IA	5	カットオフ周波数44 Hz
FM	1	Fetch モード
OI	0	圧力及び温度を同じタイミングで積分
XM	1	IIR フィルター
XN	0	デフォルトの桁数で計測
UN	5	圧力の単位は MPa

Hz、カットオフ周波数を44 Hz に設定した。他の観測パラメータについては表 5 にまとめた。また記録の開始は、2013年 9 月28日 6 時からとした。

新型自己浮上式海底水圧計の設置・回収時の様子を写真 4 に示す。外装については元々の海底地震計から大きくは変えていないため、船上から海面への投入、及び海面から甲板への揚収作業は、海底地震計の場合と同じである。また、制御収録部の水晶時計が時間経過とともに徐々にずれていくため、投入直前と回収直後に GPS マスタークロックとの時刻差を計測することで、観測データに付された時刻を校正する。今回の観測では、新型自己浮上式海底水圧計の投入直前と回収直後の時刻ずれは約10 msec であったが、以降の考察に影響しないため、ここでは時刻校正を施していない。

図 5 から図10に遠州灘で観測された新型海底水圧計のデータを 1 日ごとに示す。上からそれぞれ水圧、水温、時刻スタンプ間隔の経時変化、水圧変化のパワースペクトルである。サンプリング周波数を100 Hz に設定したので、時刻スタンプの間隔は10 msec となるはずであるが、制御収録装置の割り込み処理タイミング等の問題で、10 msec から±0.6 msec の範囲でずれることがある。水圧変化のパワースペクトルを求めるにあたっては、3 次スプライン関数で 1 msec 間隔に補間したうえでフーリエ変換した。フーリエ変換では、圧力データを、重複を許しながら約 1 時間毎の時系列に分割してスペクトルを求め、最後にそれらをスタックした。

海底水圧の平均値は11.3 MPa であり、概ね設置水深の水圧値を正常に計測できていると判断される（図 5 から図10）。水圧変化は0.007–0.01 MPa 程度の振幅で正弦波状の変化を示しているが、これは70–100 cmH_2O の振幅の海洋潮汐で説明することができる。観測された水圧変化のバラツキ（線の太さ）は 2 – 3 cmH_2O（200–300 Pa）で（図11）、パワースペクトルをみると22 Hz 付近にやや幅広だが顕著なスペクトルのピークと、0.1– 1 Hz にわたるピークが見られる（図 5 から図10）。このうち、前者の卓越周期をもつノイズは、実海域観測前に室内で実施した大気中試験でも同程度の振幅で観測されていたことから、測定環境に依るものではなく、水圧センサ自体あるいは他の装置も含めた計測システム全体に起因するものと考えられる。一方、後者は、室内実験では確認されておらず、海底環境における脈動が計測されたものと考えられる。

図10は、10月 3 日に新型自己浮上式海底水圧計の回収を行った時の記録である。 8 時00分に切り離しコマンドを送信し、 8 時21分に海面への新型自己浮上式海底水圧計の浮上が確認された。浮上中は直線的に降圧している様子がわかる。また水温は海底の水温 4 ℃から海面の水温18℃に上昇した。

図11に新型自己浮上式海底水圧計と東南海ケーブル式海底水圧計による観測記録を比較した図を示した。一見して新型自己浮上式海底水圧計の分解能が格段に優れていることがわかる。東南海ケーブル式海底水圧計の分解能は10 Hz サンプリング時 1 cmH_2O（100 Pa）なので、図11では東南海ケーブル式海底水圧計の圧力計測

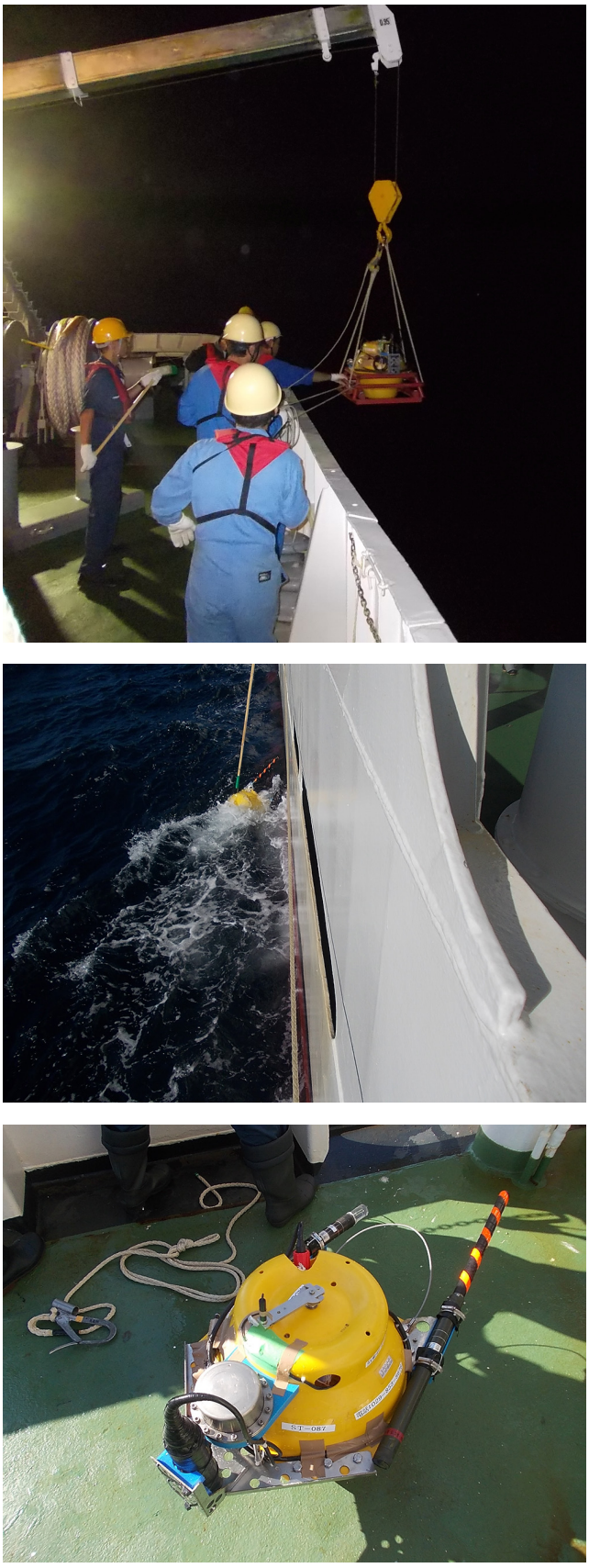

Photo 4　Deployment and recovery operations for pop-up OBPG.
Pressure gauge being deployed (top), popped-up (middle), and recovered (bottom).

写真 4　新型自己浮上式海底水圧計の設置・回収作業状況。
上：海底水圧計の投入作業　中：海底水圧計の回収作業　下：回収し、甲板に引き揚げた海底水圧計

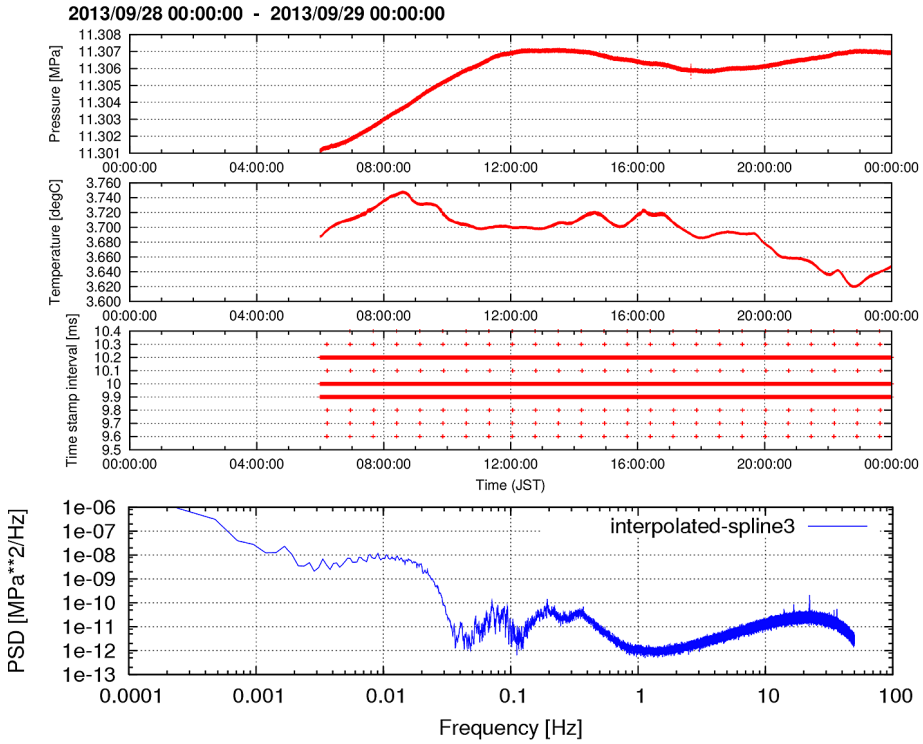

Fig. 5　Records measured with new pop-up OBPG in the deep ocean on September 28, 2013.
From top, the plots are of pressure, temperature, time-stamp interval, and power spectrum density of the pressure.

図 5　2013年 9 月28日の時系列、および水圧変化のパワースペクトル。
上から水圧、水温、サンプリング間隔、水圧変化のパワースペクトル。

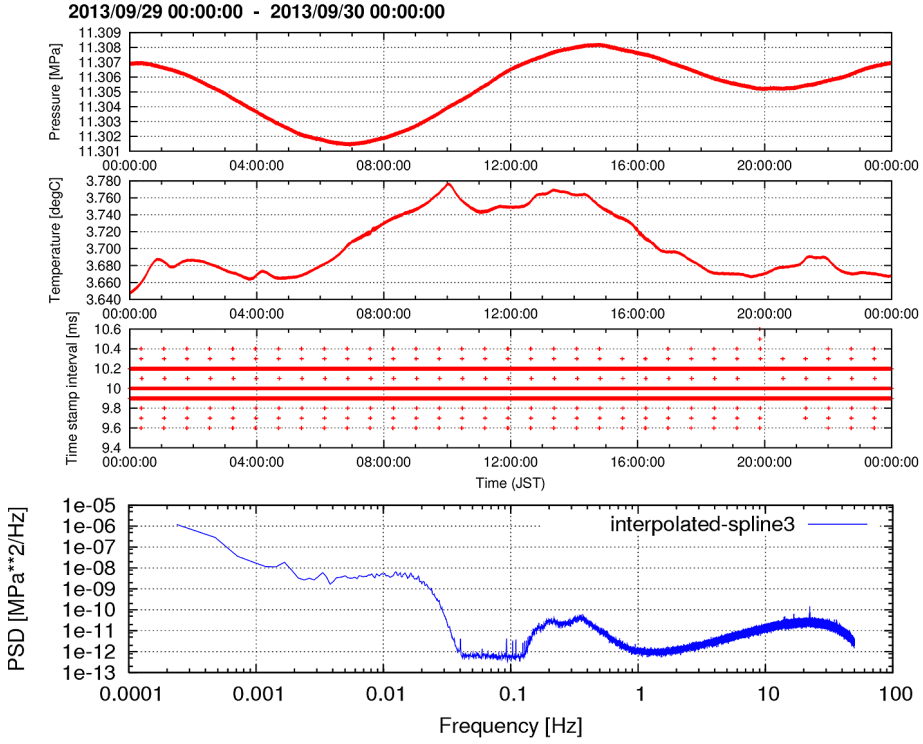

Fig. 6　Records measured with new pop-up OBPG in the deep ocean on September 29, 2013.
Plot details are the same as for Fig. 5.

図 6　2013年 9 月29日の時系列、および水圧変化のパワースペクトル。

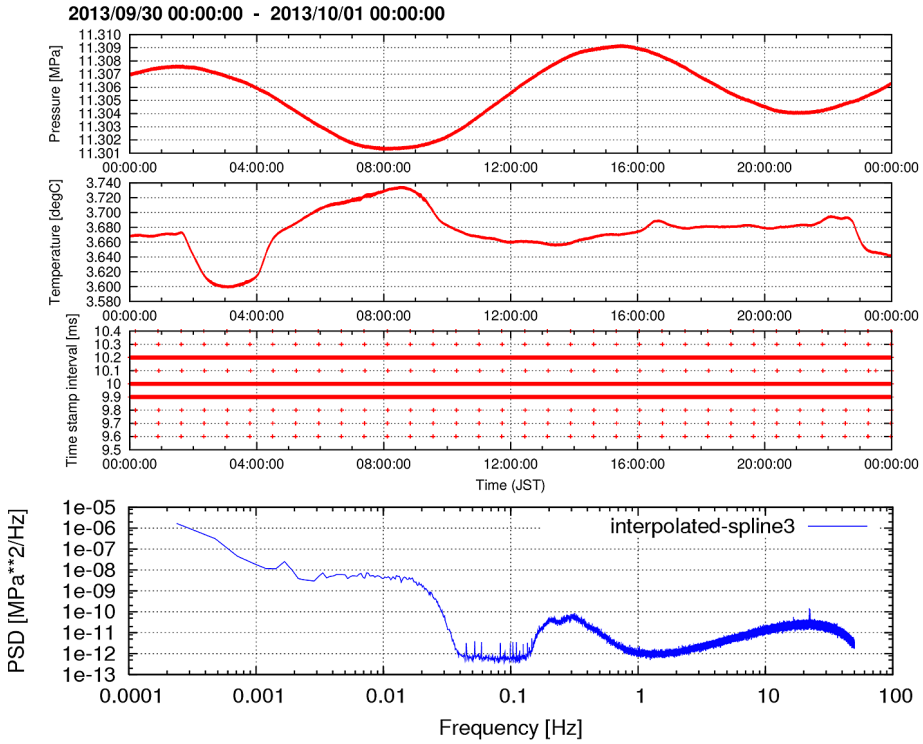

Fig. 7　Records measured with new pop-up OBPG in the deep ocean on September 30, 2013. Plot details are the same as for Fig. 5.

図 7　　2013年 9 月30日の時系列、および水圧変化のパワースペクトル。

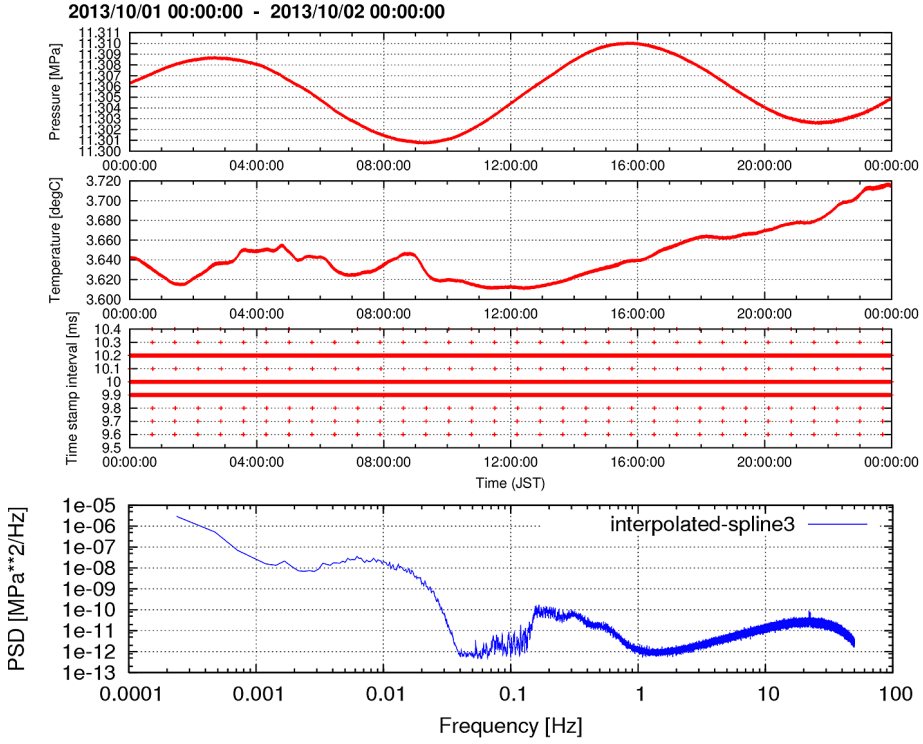

Fig. 8　Records measured with new pop-up OBPG in the deep ocean on October 1, 2013. Plot details are the same as for Fig. 5.

図 8　　2013年10月 1 日の時系列、および水圧変化のパワースペクトル。

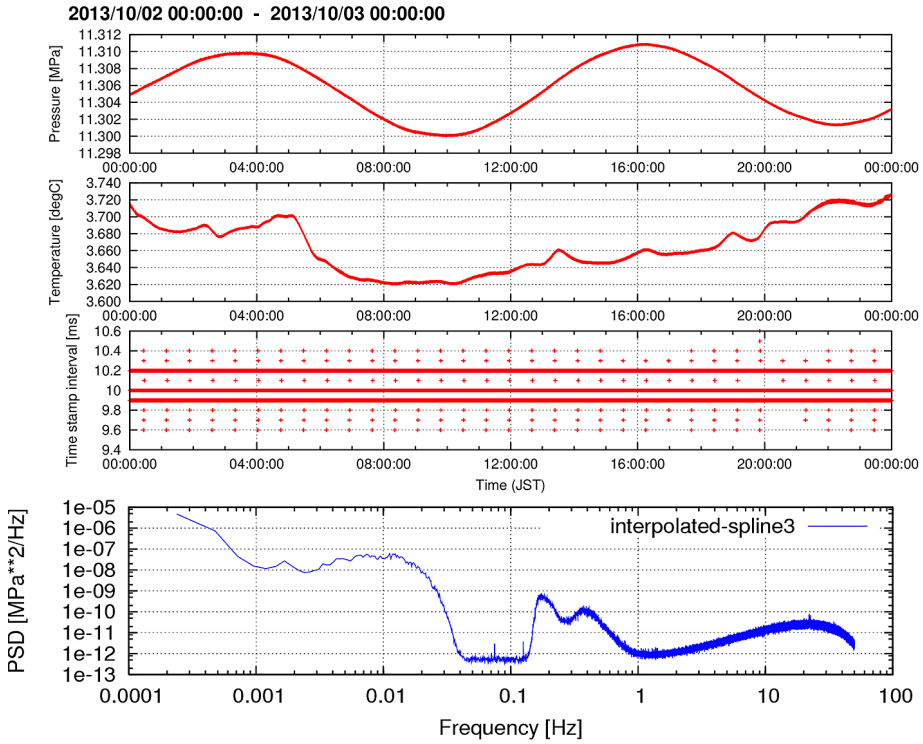

Fig. 9 Records measured with new pop-up OBPG in the deep ocean on October 2, 2013. Plot details are the same as for Fig. 5.

図 9　2013年10月 2 日の時系列、および水圧変化のパワースペクトル。

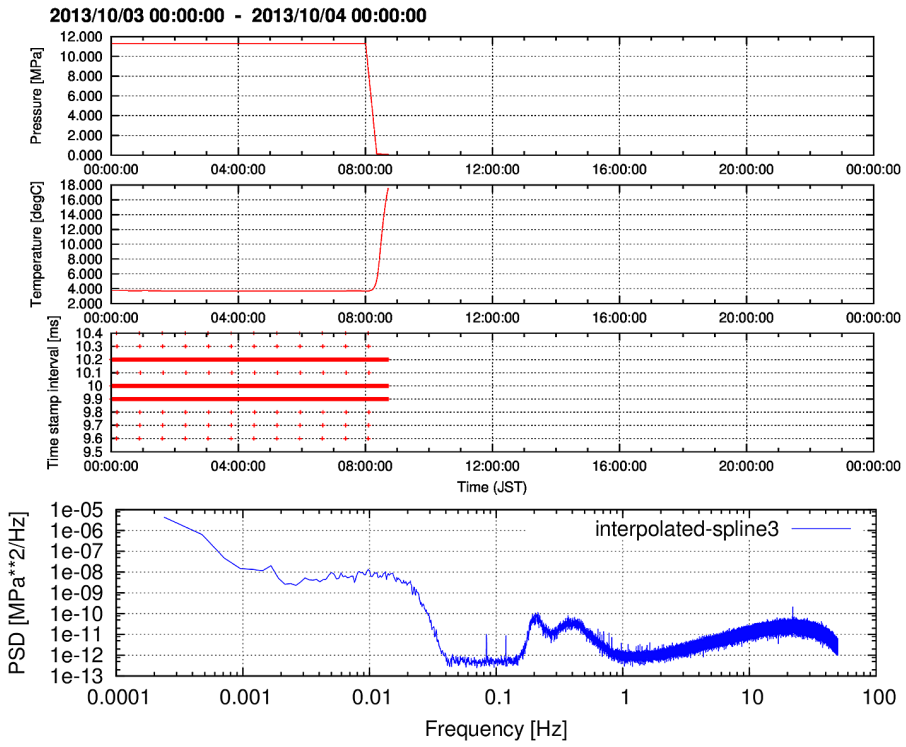

Fig. 10 Records measured with new pop-up OBPG in the deep ocean on October 3, 2013. Plot details are the same as for Fig. 5. The power spectrum density was calculated using pressure data obtained before 0800 hours JST to avoid the effect of recovery operations on the pressure measurements.

図10　2013年10月 3 日の時系列、および水圧変化のパワースペクトル。スペクトルは、回収作業開始前の時間帯（0 時から 8 時）のデータから求めた。

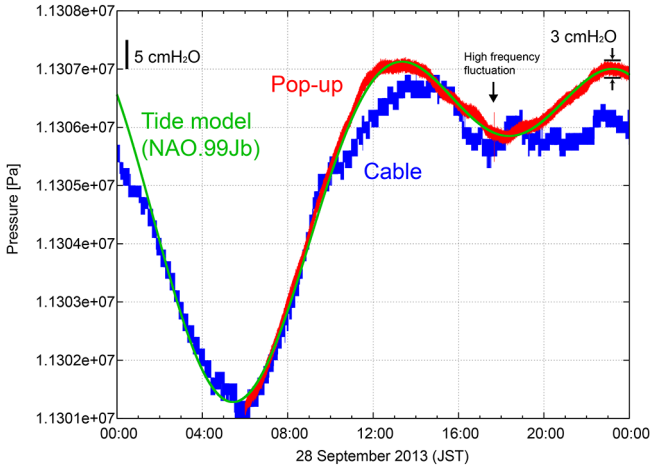

Fig. 11　Comparison of pressure data (24-h period) obtained on September 28, 2013, from the new OBPG (red line) and from existing JMA cabled pressure gauge TNK3, both located on the continental shelf off the Omaezaki Peninsula, Tokai region. Green line indicates an oceanic tide component predicted by theoretical tide model NAO.99Jb (Matsumoto *et al.*, 2000).

図11　2013年 9 月28日における新型自己浮上式海底水圧計とケーブル式海底水圧計の水圧記録の比較。赤実線は新型自己浮上式海底水圧計による観測記録（図中 Pop-up）、青実線は極近傍に設置してある気象庁の東南海ケーブル式海底水圧計 TNK3による観測記録（図中 Cable）。緑実線は理論潮汐モデル NAO.99Jb（Matsumoto *et al.*, 2000）を用いて計算した理論潮汐値（図中 Tide model）。

分解能を表す 1 量子化ステップ相当の階段状変化が視認できる。海洋潮汐モデル NAO.99Jb（Matsumoto *et al.*, 2000）による理論値（図11の緑線）と比較すると、新型自己浮上式海底水圧計で計測された圧力の長周期成分は、理論潮汐値と概ね一致する。一方、ケーブル式海底水圧計については、理論潮汐値からのずれが大きい。このずれの原因としていくつかの要因が考えられるが、もしかしたらケーブル式海底水圧計の周囲に急激な温度擾乱が起き、ケーブル式海底水圧計の製造メーカーから提供された温度補正係数を用いた静的温度補正だけでは補正しきれなかったために生じた見かけの圧力変動が計測されたのかもしれない（例えば、Baba *et al.*, 2006; Hirata and Baba, 2006; Inazu and Hino, 2011）。ケーブル式海底水圧計の観測水圧変化と理論潮汐値とのずれの原因の究明は本論の目的から外れるため、ここではその原因の 1 つの可能性だけを指摘するに留める。

図12は、今回の実海域試験の観測期間中の2013年 9 月28日17時40分頃に新型自己浮上式海底水圧計で捉えられた微小な水圧変動の100 Hz サンプリング観測波形（赤実線）である（図11の矢印部分に相当）。比較のために、極近傍に設置されていた気象庁の東南海ケーブル式海底水圧計 TNK3の10 Hz サンプリング観測波形（青実線）も図中に示している。新型自己浮上式海底水圧計では、17時40分36.4秒、17時40分40.3秒、および17時40分40.6秒に、 3 つのバースト信号状の短周期の水圧変動が観測されている。 3 つのバースト信号状の水圧変動の振幅は、それぞれ両振幅で、約7.4 cmH_2O（約740 Pa）、約3.5 cmH_2O（約350 Pa）、および約6.7 cmH_2O（約670 Pa）、その主要な周期はいずれも約0.07秒（約15 Hz）と見積もられる。気象庁の一元化地震カタログには、これらの水圧変動が生じた時間帯に震源時を持つ地震は掲載されていない。仮に、 1 つ目を P 波、 2 つ目を堆積層下端で変換した SP 変換波、 3 つ目を SV 波とみなすのならば、S－P 時間は約 4 秒と見積もられ、震源距離が数10 km 程度の地点で発生した近地の微小地震と解釈できる。

注目すべきは、新型自己浮上式海底水圧計の100 Hz サンプリング記録に現れているこれらの水圧変動が、10 Hz サンプリングの気象庁の東南海ケーブル式海底水圧計 TNK3では記録されていない点である。東南海ケーブル式海底水圧計の10 Hz サンプリング計測時（水晶発振器のカウンタ数とクロック数から0.1秒間の発振周波

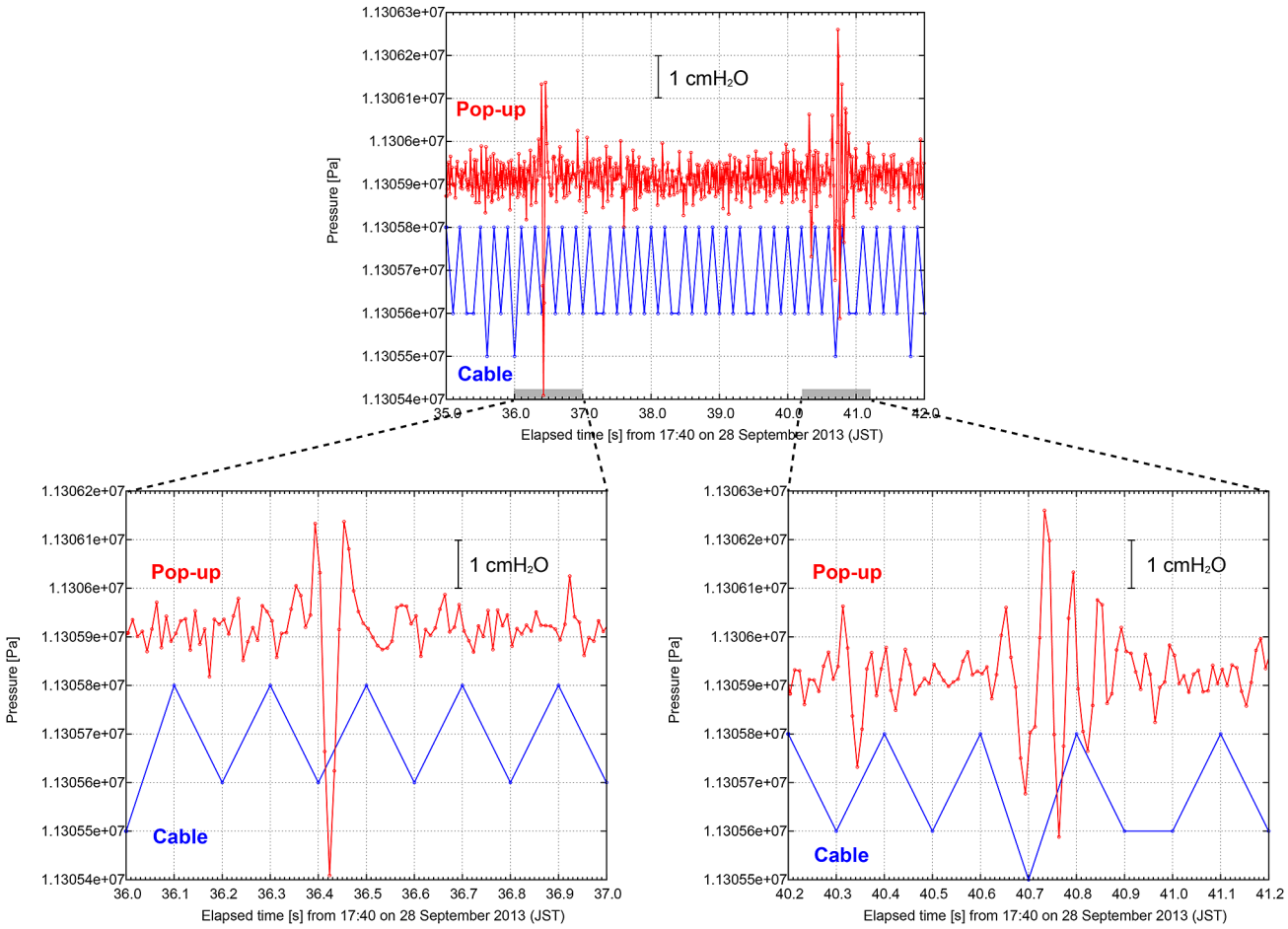

Fig. 12　Comparison of pressure data obtained during a test experiment at 17:40 (JST) on September 28, 2013, from the new OBPG (0.01-sec intervals, red line) and from existing JMA cabled pressure gauge TNK3 (0.1-sec intervals, blue line), both located on the continental shelf off the Omaezaki Peninsula, Tokai region. These data indicate that the new OBPG system provides superior pressure sensitivity and resolves pressure changes at higher frequencies.

図12　実海域試験中の2013年 9 月28日17時40分頃に観測された微小水圧変動の観測例。赤実線は新型自己浮上式海底水圧計で観測された波形記録（図中 Pop-up）、青実線は極近傍に設置してある気象庁の東南海ケーブル式海底水圧計 TNK3による観測記録（図中 Cable）。

数を計算した場合）の圧力分解能は約 1 cmH_2O（100 Pa）であり（図 1 ）、その計測分解能から単純に考えると、TNK3でもこれら 3 つの信号が記録されていても良いように思われる。しかし、これら15 Hz に主要な周波数を持つ 3 つのバースト状信号は、東南海ケーブル式海底水圧計による10 Hz サンプリング計測の Nyquist 周波数 5 Hz よりも高い周波数領域に主要なパワーを持つ変動現象であったために、エイリアシング作用によって周波数軸上で 2 回折り返され、 5 Hz 付近（ 5 Hz よりほんの少し低周波数側）の偽信号成分あるいは折り返し雑音成分として計測されてしまっているものと想像される。

サンプリング定理により、東南海ケーブル式海底水圧計 TNK3の10 Hz サンプリング波形記録では 5 Hz 以上の信号成分は評価することはできない。したがって、図12の東南海ケーブル式海底水圧計 TNK3の記録で視認できる周期0.2秒、両振幅で 2 - 3 cmH_2O（200-300 Pa）の信号は、海底で生じている背景的水圧変動の 5 Hz 付近の成分だけを計測したのではなく、おそらく Nyquist 周波数 5 Hz 以上の高周波数帯域の信号から派生した折り返し雑音成分も含まれていると考えられる。さらに、このようなエイリアシング現象に加え、東南海ケーブル式水圧計の圧力計測分解能は 1 cmH_2O と粗いため、量子化ステップとしては 2 - 3 つ分しかない、ダイナ

ミックレンジが非常に狭い計測となってしまっている。繰り返しになるが、サンプリング定理に基づけば、東南海ケーブル式海底水圧計では 5 Hz の周波数の信号は評価できない。

4. まとめ

気象研究所では、細かい圧力分解能で海底圧力を高速サンプリング計測できる自己浮上式海底水圧計を新たに開発し、その性能を評価するため遠州灘で実海域試験を行った。開発した自己浮上式海底水圧計は、既存の海底地震計をベースにして改造したもので、水圧センサと同水圧センサ専用の制御収録装置等が組み込まれており、海底の圧力及び温度を計測することができる。最高100 Hz サンプリングの計測が可能で、圧力分解能は100 Hz サンプリング時で約 3 cmH_2O（300 Pa）、10 Hz サンプリング時で約0.3 mmH_2O（ 3 Pa）、 1 Hz サンプリング時で約0.1 mmH_2O（ 1 Pa）である（表 3 ）。観測可能期間は最長で 6 ヶ月である。

遠州灘の実海域試験においては、2008年以降稼働中のケーブル式海底水圧計近傍の深海底（水深1116 m）に約 1 週間設置し、100 Hz サンプリングで海底圧力・温度の試験観測を行った。その結果、(1) 海洋潮汐に伴う長周期の圧力変動と、(2) 3 つのバースト信号状の短周期変動から成る圧力変動が計測された。(1)の長周期変動は、ケーブル式海底水圧計で記録された変動と概ね一致するが、新型海底水圧計のほうが微細な圧力変動を計測できており、その圧力分解能の高さを示している。また、(2)の短周期変動の波群はケーブル式海底水圧計では計測されていない。このことは本研究で開発した新型自己浮上式海底水圧計が高い計測能力を有していることを示している。一方で、自己浮上式海底水圧計の圧力記録には、 2 – 3 cmH_2O（200–300 Pa）の範囲で定常的なばらつきがあり、周波数領域では、22 Hz 付近と0.2 Hz に付近にそれぞれ幅広なピークがみられた。室内における大気中試験観測結果も踏まえると、前者は水圧センサあるいはその他の装置も含めた計測システム全体に起因、後者はおそらく海底での脈動を記録したものと考えられる。

今回は短期間の観測であったが、開発した新型海底水圧計の性能を実海域試験を通して検証することができた。今後は、より長期間の実海域観測を実施し、このように通常は観測されていない高周波数帯域の地震動等による水圧変動の観測事例を増やすことにより，海底で生じている水圧変動現象の全体像を調査するとともに、新型海底水圧計の性能をさらに検証していく必要があるだろう。

謝　　辞

本研究は、平成22年度から平成25年度にかけて、気象研究所地震火山研究部（当時）の重点研究「沖合・沿岸津波観測等による津波の高精度予測に関する研究」によっておこなわれた。本研究で開発した自己浮上式海底水圧計は気象研究所からの役務契約に基づき東京測振(株)によって製作された。同社の松原忠泰氏、伊藤芳孝氏、伊藤立也氏、杉田智也氏には製作過程および実海域試験などでお世話になった。また、水圧センサの検討や詳細な技術資料の入手には東邦マーカンタイル(株)の大井拓磨氏のお世話になった。実海域試験においては、気象庁地球環境・海洋部の海洋気象観測船「凌風丸」に協力いただき、佐々木修船長以下乗組員、観測員をはじめ多くの関係者の方々のお世話になった。気象庁の東南海ケーブル式海底水圧計のデータの取得にあたっては、気象庁地震火山部の本多誠一郎氏、桑山辰夫氏、清本真司氏、上野寛氏、秋山加奈氏、丹下豪氏、および気象研究所地震津波研究部の林元直樹氏にご助力いただいた。一部の図の作成には、Generic Mapping Tool (Wessel and Smith, 1998) を使用した。記して、感謝の意を表する。

参考文献

Baba, T., K. Hirata, T. Hori, and H. Sakaguchi, 2006: Offshore geodetic data conducive to the estimation of the afterslip distribution following the 2003 Tokachi-Oki earthquake. *Earth Planet. Sci. Lett*., **241**, 281-292, doi: 10.1016/j.epsl.2005.10.019.

Crawford, W. C., S. C. Webb, and J. A. Hildebrand, 1991: Seafloor compliance observed by long-period pressure and displacement measurements. *J. Geophys. Res*., **96**, 16,151-16,160.

Eguchi, T., Y. Fujinawa, E. Fujita, S. Iwasaki, I. Watabe, and H. Fujiwara, 1998: A real-time observation network of ocean-bottom-seismometers deployed at the Sagami trough subduction zone, central Japan. *Mar. Geophys. Res*., **20**, 73-94, doi:10.1023/A:1004334021329.

Filloux, J. H., 1982: Tsunami recorded on the open ocean floor. *Geophys. Res. Lett*., **9**, 25-28.

藤沢格・立山清二・舟崎淳，1986: 房総沖海底地震常時観測システムの概要．*測候時報*，**53**，127-166.

日野亮太・藤本博巳・桑野亜佐子・西野実・金沢敏彦・酒井慎一・中尾茂，2005: 三陸沖光ケーブル式海底地震・津波観測システムによる津波計測－リアルタイム・沖合観測の有効性－．*月刊地球*，**27**，190-196.

Hino, R., S. Ii, T. Iinuma, and H. Fujimoto, 2009: Continuous long-term seafloor pressure observation for detecting slow-slip interplate events in Miyagi-Oki on the landward Japan Trench slope. *J. Disaster Res*., **4**, 72-82.

Hino, R., D. Inazu, Y. Ohta, Y. Ito, S. Suzuki, T. Iinuma, Y. Osada, M. Kido, H. Fujimoto, and Y. Kaneda, 2014: Was the 2011 Tohoku-Oki earthquake preceded by aseismic preslip? Examination of seafloor vertical deformation data near the trench. *Mar. Geophys. Res*., **35**, 181-190, doi:10.1007/s11001-013-9208-2.

Hirata, K., M. Aoyagi, H. Mikada, K. Kawaguchi, Y. Kaiho, R. Iwase, S. Morita, I. Fujisawa, H. Sugioka, K. Mitsuzawa, K. Suyehiro, H. Kinoshita, and N. Fujiwara, 2002: Real-time geophysical measurements on the deep seafloor using submarine cable in the southern Kurile subduction zone. *IEEE J. Oceanic Eng.,* **27 (2)**, 170-181.

Hirata, K., H. Takahashi, E. Geist, K. Satake, Y. Tanioka, H. Sugioka, and H. Mikada, 2003: Source depth dependence of micro-tsunamis recorded with ocean-bottom pressure gauges: the January 28, 2000 M_w 6.8 earthquake off Nemuro Peninsula, Japan. *Earth Planet. Sci. Lett*., **208**, 305-318.

平田賢治・馬場俊孝，2004: 2003年十勝沖地震によって生じた津波の誕生の瞬間，2004年地球惑星科学関連合同大会，S043-001，千葉市，2004年 5 月．

Hirata, K., and T. Baba, 2006: Transient thermal response in ocean bottom pressure measurement. *Geophys. Res. Lett*., **33**, L10606, doi:10.1029/2006GL026084.

Hirata, K., 2011: Issues specific to local (near-field) tsunamis and challenges for detecting these events, *Workshop on Local (Near Field) Tsunami Detection, Assessment and Warning Guidance, the MTS/IEEE OCEANS 2011*, Kona, Hawaii, Sept., 2011.

Hoshiba, M., and K. Iwakiri, 2011: Initial 30 seconds of the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake (M_w 9.0) – amplitude and τ_c for magnituide estimation for Earthquake Early Warning. *Earth Planets Space*, **63**, 553-557, doi:10.5047/eps.2011.06.015.

Inazu, D., and R. Hino, 2011: Temperature correction and usefulness of ocean bottom pressure data from cabled seafloor observatories around Japan for analyses of tsunamis, ocean tides, and low-frequency geophysical phenomena. *Earth Planets Space*, **63**, 1133-1149, doi:10.5047/eps.2011.07.014.

Kajiura, K., 1970: Tsunami source, energy and the directivity of wave radiation. *Bull. Earthq. Res. Inst*., **48 (5)**, 835-869.

Kanazawa, T., and A. Hasegawa, 1997: Ocean-bottom observatory for earthquakes and tsunami off Sanriku, northeast Japan using submarine cable, *Proc. International Workshop on Scientific Use of Submarine Cables*, 208-209.

河合弘泰・佐藤真・川口浩二・関克己，2011: GPS 波浪計で捉えた平成23年東北地方太平洋沖地震津波．*土木学会論文集 B2（海岸工学）*，**67 (2)**, I_1291-I_1295.

気象研究所地震火山研究部，1980: 海底地震常時観測システムの開発．*気象研究所技術報告*，**4**, 1-233.

Li, W., Y. Harry, K. Hirata, and T. Baba, 2008: Ocean-bottom pressure variations during the 2003 Tokachi-oki earthquake, *Nonlinear Wave Dynamics: Selected Papers of the Symposium held in honor of Phillip L-F Liu's 60th Birthday*, World Scientific, 109-126.

松本浩幸・三ケ田均・杉岡裕子，2005: 海底水圧計で観測される音響波から津波を予測する．*月刊地球*，**27**, 206-209.

Matsumoto, K., T. Takanezawa, and M. Ooe, 2000: Ocean tide models developed by assimilating TOPEX/POSEIDON altimeter data into hydrodynamical model: A global model and a regional model around Japan. *J. Oceanogr.*, **56**, 567-581, doi:10.1023/A:1011157212596.

Momma, H., N. Fujiwara, K. Kawaguchi, R. Iwase, S. Suzuki, and H. Kinoshita, 1997: Monitoring system for submarine earthquakes and deep sea environment, *Oceans '97 MTS/IEEE: Conference Proceedings 6-9 October 1997*, **2**, 1453-1459.

永井紀彦・額田恭史・岩崎峯夫・久高将信，2002: 切れ目のない連続観測とスペクトル周期帯表示による全国沿岸の長周期波観測情報システム．*海洋開発論文集*，**18**, 149-154.

岡田正実・磯崎一郎，1984: 第 2 章　津波および外洋潮汐観測への応用．*気象研究所技術報告*，**9**, 9-12.

Okada, M., 1995: Tsunami observation by ocean bottom pressure change, in *Tsunami: Progress in Prediction, Disaster Prevention and Warning (eds.Y.Tsuchiya and N.Shuto)*, Kluwer Academic Publishers, 287-303.

Paroscientific Inc., 2010: Digiquartz pressure instrumentation, User's Manual for Digiquartz Broadband intelligent instruments with Dual RS-232 and RS-485 interfaces, Document No.8819-001, Revision R.

齋藤祥司，2007: 東海沖から熊野沖に新たに整備するケーブル式海底地震計システムについて．*月刊地球*，**29**, 516-522.

佐藤利典・松原忠泰・川野昭博，2011: 自己浮上式海底地震計へ搭載可能な上下変動計（圧力計）の開発，日本地震学会2011年度秋季大会予稿集，P2-59.

舘畑秀衛，1998: 津波数値計算技術の津波予報への応用．*月刊海洋*，**号外15**, 23-30.

寺田幸博，2013: GPS 津波計・波浪計・潮位計開発の現状と展望．*産官学連携ジャーナル*，**2013年 4 月号**, https://sangakukan.jp/journal/journal_contents/2013/04/articles/1304-06/1304-06_article.html.

東京測振，2013: 海底圧力計制御収録部取扱説明書 Rev. 3.1.

Tsushima, H., K. Hirata, Y. Hayashi, Y. Tanioka, K. Kimura, S. Sakai, M. Shinohara, T. Kanazawa, R. Hino, and K. Maeda, 2011: Near-field tsunami forecasting using offshore tsunami data from the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake. *Earth Planets Space*, **63**, 821-826, doi:10.5047/eps.2011.06.052.

Watanabe, T., H. Matsumoto, H. Sugioka, H. Mikada, and K. Suyehiro, 2004: Offshore monitoring system records recent earthquake off Japan's northernmost Island. *Eos, Trans. AGU*, **85 (2)**, 14, doi:10.1029/2004EO020003.

Wessel, P., and W. H. F. Smith, 1998: New, improved version of Generic Mapping Tools released. *EOS Trans. AGU*, **79 (47)**, 579, doi:10.1029/98EO00426.

気象研究所技術報告一覧表

第 1 号　バックグラウンド大気汚染の測定法の開発（地球規模大気汚染特別研究班，1978）
Development of Monitoring Techniques for Global Background Air Pollution. (MRI Special Research Group on Global Atmospheric Pollution, 1978)

第 2 号　主要活火山の地殻変動並びに地熱状態の調査研究（地震火山研究部，1979）
Investigation of Ground Movement and Geothermal State of Main Active Volcanoes in Japan. (Seismology and Volcanology Research Division, 1979)

第 3 号　筑波研究学園都市に新設された気象観測用鉄塔施設（花房龍男，藤谷徳之助，伴野登，魚津博，1979）
On the Meteorological Tower and Its Observational System at Tsukuba Science City. (T. Hanafusa, T. Fujitani, N. Banno, and H. Uozu, 1979)

第 4 号　海底地震常時観測システムの開発（地震火山研究部，1980）
Permanent Ocean − Bottom Seismograph Observation System. (Seismology and Volcanology Research Division, 1980)

第 5 号　本州南方海域水温図－400m（又は500m）深と1,000m 深－（1934−1943年及び1954−1980年）（海洋研究部，1981）
Horizontal Distribution of Temperature in 400m (or 500m) and 1,000m Depth in Sea South of Honshu, Japan and Western − North Pacific Ocean from 1934 to 1943 and from 1954 to 1980. (Oceanographical Research Division, 1981)

第 6 号　成層圏オゾンの破壊につながる大気成分及び紫外日射の観測（高層物理研究部，1982）
Observations of the Atmospheric Constituents Related to the Stratospheric ozon Depletion and the Ultraviolet Radiation. (Upper Atmosphere Physics Research Division, 1982)

第 7 号　83型強震計の開発（地震火山研究部，1983）
Strong − Motion Seismograph Model 83 for the Japan Meteorological Agency Network. (Seismology and Volcanology Research Division, 1983)

第 8 号　大気中における雪片の融解現象に関する研究（物理気象研究部，1984）
The Study of Melting of Snowflakes in the Atmosphere. (Physical Meteorology Research Division, 1984)

第 9 号　御前崎南方沖における海底水圧観測（地震火山研究部・海洋研究部，1984）
Bottom Pressure Observation South off Omaezaki, Central Honsyu. (Seismology and Volcanology Research Division and Oceanographical Research Division, 1984)

第10号　日本付近の低気圧の統計（予報研究部，1984）
Statistics on Cyclones around Japan. (Forecast Research Division, 1984)

第11号　局地風と大気汚染質の輸送に関する研究（応用気象研究部，1984）
Observations and Numerical Experiments on Local Circulation and Medium − Range Transport of Air Pollutions. (Applied Meteorology Research Division, 1984)

第12号　火山活動監視手法に関する研究（地震火山研究部，1984）
Investigation on the Techniques for Volcanic Activity Surveillance. (Seismology and Volcanology Research Division, 1984)

第13号　気象研究所大気大循環モデル- Ⅰ（MRI・GCM －Ⅰ）（予報研究部，1984）
A Description of the MRI Atmospheric General Circulation Model (The MRI・GCM−I). (Forecast Research Division, 1984)

第14号　台風の構造の変化と移動に関する研究－台風7916の一生－（台風研究部，1985）
A Study on the Changes of the Three - Dimensional Structure and the Movement Speed of the Typhoon through its Life Time. (Typhoon Research Division, 1985)

第15号　波浪推算モデル MRI と MRI‐Ⅱの相互比較研究－計算結果図集－（海洋気象研究部，1985）
An Intercomparison Study between the Wave Models MRI and MRI−II − A Compilation of Results − (Oceanographical Research Division, 1985)

第16号　地震予知に関する実験的及び理論的研究（地震火山研究部，1985）
Study on Earthquake Prediction by Geophysical Method. (Seismology and Volcanology Research Division, 1985)

第17号　北半球地上月平均気温偏差図（予報研究部，1986）
Maps of Monthly Mean Surface Temperature Anomalies over the Northern Hemisphere for 1891−1981. (Forecast Research Division, 1986)

第18号　中層大気の研究（高層物理研究部，気象衛星研究部，予報研究部，地磁気観測所，1986）
Studies of the Middle Atmosphere. (Upper Atmosphere Physics Research Division, Meteorological Satellite Research Division, Forecast Research Division, MRI and the Magnetic Observatory, 1986)

第19号　ドップラーレーダによる気象・海象の研究（気象衛星研究部・台風研究部・予報研究部・応用気象研究部・海洋研究部，1986）
Studies on Meteorological and Sea Surface Phenomena by Doppler Radar. (Meteorological Satellite Research Division, Typhoon Research Division, Forecast Research Division, Applied Meteorology Research Division, and Oceanographical Research Division, 1986)

第20号　気象研究所対流圏大気大循環モデル（MRI・GCM‐Ⅰ）による12年間分の積分（予報研究部，1986）
Mean Statistics of the Tropospheric MRI・GCM−I based on 12− year Integration. (Forecast Research Division, 1986)

第21号　宇宙線中間子強度1983−1986（高層物理研究部，1987）
Multi − Directional Cosmic Ray Meson Intensity 1983−1986. (Upper Atmosphere Physics Research Division, 1987)

第22号　静止気象衛星「ひまわり」画像の噴火噴煙データに基づく噴火活動の解析に関する研究（地震火山研究部，1987）
Study on Analysis of Volcanic Eruptions based on Eruption Cloud Image Data obtained by the Geostationary Meteorological

satellite (GMS). (Seismology and Volcanology Research Division, 1987)

第23号　オホーツク海海洋気候図（篠原吉雄，四竈信行，1988）
Marine Climatological Atlas of the sea of Okhotsk. (Y. Shinohara and N. Shikama, 1988)

第24号　海洋大循環モデルを用いた風の応力異常に対する太平洋の応答実験（海洋研究部，1989）
Response Experiment of Pacific Ocean to Anomalous Wind Stress with Ocean General Circulation Model. (Oceanographical Research Division, 1989)

第25号　太平洋における海洋諸要素の季節平均分布（海洋研究部，1989）
Seasonal Mean Distribution of Sea Properties in the Pacific. (Oceanographical Research Division, 1989)

第26号　地震前兆現象のデータベース（地震火山研究部，1990）
Database of Earthquake Precursors. (Seismology and Volcanology Research Division, 1990)

第27号　沖縄地方における梅雨期の降水システムの特性（台風研究部，1991）
Characteristics of Precipitation Systems During the Baiu Season in the Okinawa Area. (Typhoon Research Division, 1991)

第28号　気象研究所・予報研究部で開発された非静水圧モデル（猪川元興・斉藤和雄，1991）
Description of a Nonhydrostatic Model Developed at the Forecast Research Department of the MRI. (M. Ikawa and K. Saito, 1991)

第29号　雲の放射過程に関する総合的研究（気候研究部・物理気象研究部・応用気象研究部・気象衛星・観測システム研究部・台風研究部，1992）
A Synthetic Study on Cloud − Radiation Processes. (Climate Research Department, Physical Meteorology Research Department, Applied Meteorology Research Department, Meteorological Satellite and Observation System Research Department, and Typhoon Research Department, 1992)

第30号　大気と海洋・地表とのエネルギー交換過程に関する研究（三上正男・遠藤昌宏・新野　宏・山崎孝治，1992）
Studies of Energy Exchange Processes between the Ocean − Ground Surface and Atmosphere. (M. Mikami, M. Endoh, H. Niino, and K. Yamazaki, 1992)

第31号　降水日の出現頻度からみた日本の季節推移－30年間の日降水量資料に基づく統計－（秋山孝子，1993）
Seasonal Transition in Japan, as Revealed by Appearance Frequency of Precipitating-Days. − Statistics of Daily Precipitation Data During 30 Years − (T. Akiyama, 1993)

第32号　直下型地震予知に関する観測的研究（地震火山研究部，1994）
Observational Study on the Prediction of Disastrous Intraplate Earthquakes. (Seismology and Volcanology Research Department, 1994)

第33号　各種気象観測機器による比較観測（気象衛星・観測システム研究部，1994）
Intercomparisons of Meteorological Observation Instruments. (Meteorological Satellite and Observation System Research Department, 1994)

第34号　硫黄酸化物の長距離輸送モデルと東アジア地域への適用（応用気象研究部，1995）
The Long − Range Transport Model of Sulfur Oxides and Its Application to the East Asian Region. (Applied Meteorology Research Department, 1995)

第35号　ウインドプロファイラーによる気象の観測法の研究（気象衛星・観測システム研究部，1995）
Studies on Wind Profiler Techniques for the Measurements of Winds. (Meteorological Satellite and Observation System Research Department, 1995)

第36号　降水・落下塵中の人工放射性核種の分析法及びその地球化学的研究（地球化学研究部，1996）
Geochemical Studies and Analytical Methods of Anthropogenic Radionuclides in Fallout Samples. (Geochemical Research Department, 1996)

第37号　大気と海洋の地球化学的研究（1995年及び1996年）（地球化学研究部，1998）
Geochemical Study of the Atmosphere and Ocean in 1995 and 1996. (Geochemical Research Department, 1998)

第38号　鉛直 2 次元非線形問題（金久博忠，1999）
Vertically 2-dmensional Nonlinear Problem (H. Kanehisa, 1999)

第39号　客観的予報技術の研究（予報研究部，2000）
Study on the Objective Forecasting Techniques（Forecast Research Department, 2000）

第40号　南関東地域における応力場と地震活動予測に関する研究（地震火山研究部，2000）
Study on Stress Field and Forecast of Seismic Activity in the Kanto Region（Seismology and Volcanology Research Department, 2000）

第41号　電量滴定法による海水中の全炭酸濃度の高精度分析および大気中の二酸化炭素と海水中の全炭酸の放射性炭素同位体比の測定（石井雅男・吉川久幸・松枝秀和，2000）
Coulometric Precise Analysis of Total Inorganic Carbon in Seawater and Measurements of Radiocarbon for the Carbon Dioxide in the Atmosphere and for the Total Inorganic Carbon in Seawater（I.Masao, H.Y.Inoue and H.Matsueda, 2000）

第42号　気象研究所／数値予報課統一非静力学モデル（斉藤和雄・加藤輝之・永戸久喜・室井ちあし，2001）
Documentation of the Meteorological Research Institute/Numerical Prediction Division Unified Nonhydrostatic Model (Kazuo Saito, Teruyuki Kato, Hisaki Eito and Chiashi Muroi, 2001)

第43号　大気および海水中のクロロフルオロカーボン類の精密測定と気象研究所クロロフルオロカーボン類標準ガスの確立（時枝隆之・井上（吉川）久幸，2004）
Precise measurements of atmospheric and oceanic chlorofluorocarbons and MRI chlorofluorocarbons calibration scale (Takayuki Tokieda and Hisayuki Y. Inoue，2004)

第44号　PostScript コードを生成する描画ツール “PLOTPS” マニュアル（加藤輝之，2004）
Documentation of “PLOTPS”: Outputting Tools for PostScript Code (Teruyuki Kato, 2004)

第45号　気象庁及び気象研究所における二酸化炭素の長期観測に使用された標準ガスのスケールとその安定性の再評価に関する調査・研究（松枝秀和・須田一人・西岡佐喜子・平野礼朗・澤　庸介・坪井一寛・堤　之智・神谷ひとみ・根本和宏・長井秀樹・吉田雅司・岩野園城・山本　治・森下秀昭・鎌田匡俊・和田　晃，2004）
Re-evaluation for scale and stability of CO_2 standard gases used as long-term observations at the Japan Meteorological Agency and the Meteorological Research Institute (Hidekazu Matsueda, Kazuto Suda, Sakiko Nishioka, Toshirou Hirano, Yousuke, Sawa, Kazuhiro Tuboi, Tsutumi, Hitomi Kamiya, Kazuhiro Nemoto, Hideki Nagai, Masashi Yoshida, Sonoki Iwano, Osamu Yamamoto, Hideaki Morishita, Kamata, Akira Wada, 2004)

第46号　地震発生過程の詳細なモデリングによる東海地震発生の推定精度向上に関する研究（地震火山研究部，2005）
A Study to Improve Accuracy of Forecasting the Tokai Earthquake by Modeling the Generation Processes (Seismology and Volcanology Research Department, 2005)

第47号　気象研究所共用海洋モデル（MRI.COM）解説（海洋研究部，2005）
Meteorological Research Institute Community Ocean Model (MRI.COM) Manual (Oceanographical Research Department, 2005)

第48号　日本海降雪雲の降水機構と人工調節の可能性に関する研究（物理気象研究部・予報研究部，2005）
Study of Precipitation Mechanisms in Snow Clouds over the Sea of Japan and Feasibility of Their Modification by Seeding (Physical Meteorology Research Department, Forecast Research Department, 2005)

第49号　2004年日本上陸台風の概要と環境場（台風研究部，2006）
Summary of Landfalling Typhoons in Japan, 2004 (Typhoon Research Department, 2006)

第50号　栄養塩測定用海水組成標準の2003年国際共同実験報告（青山道夫，2006）
2003 Intercomparison Exercise for Reference Material for Nutrients in Seawater in a Seawater Matrix (Michio Aoyama, 2006)

第51号　大気および海水中の超微量六フッ化硫黄（SF_6）の測定手法の高度化と SF_6 標準ガスの長期安定性の評価（時枝隆之・石井雅男・斉藤　秀・緑川　貴，2007）
Highly developed precise analysis of atmospheric and oceanic sulfur hexafluoride (SF_6) and evaluation of SF_6 standard gas stability (Takayuki Tokieda, Masao Ishii, Shu Saito and Takashi Midorikawa, 2007)

第52号　地球温暖化による東北地方の気候変化に関する研究（仙台管区気象台・環境・応用気象研究部，2008）
Study of Climate Change over Tohoku District due to Global Warming (Sendai District Meteorological Observatory, Atmospheric Environment and Applied Meteorology Research Department, 2008)

第53号　火山活動評価手法の開発研究（地震火山研究部，2008）
Studies on Evaluation Method of Volcanic Activity (Seismology and Volcanology Research Department, 2008)

第54号　日本における活性炭冷却捕集およびガスクロ分離による気体計数システムによる ^{85}Kr の測定システムの構築および1995年から2006年の測定結果（青山道夫・藤井憲治・廣瀬勝己・五十嵐康人・磯貝啓介・新田　済，Hartmut Sartorius, Clemens Schlosser, Wolfgang Weiss, 2008）
Establishment of a cold charcoal trap-gas chromatography-gas counting system for 85Kr measurements in Japan and results from 1995 to 2006 (Michio Aoyama, Kenji Fujii, Katsumi Hirose, Yasuhito Igarashi, Keisuke Isogai, Wataru Nitta, Hartmut Sartorius, Clemens Schlosser, Wolfgang Weiss, 2008)

第55号　長期係留による 4 種類の流速計観測結果の比較（中野俊也・石崎　廣・四竈信行，2008）
Comparison of Data from Four Current Meters Obtained by Long-Term Deep-Sea Moorings (Toshiya Nakano, Hiroshi Ishizaki and Nobuyuki Shikama, 2008)

第56号　CMIP3マルチモデルアンサンブル平均を利用した将来の海面水温・海氷分布の推定（水田　亮・足立恭将・行本誠史・楠　昌司，2008）
Estimation of the Future Distribution of Sea Surface Temperature and Sea Ice Using the CMIP3 Multi-model Ensemble Mean (Ryo Mizuta, Yukimasa Adachi, Seiji Yukimoto and Shoji Kusunoki, 2008)

第57号　閉流路中のフローセルを用いた分光光度法自動分析装置による海水の高精度 pHT 測定（斉藤　秀・石井雅男・緑川　貴・井上（吉川）久幸，2008）
Precise Spectrophotometric Measurement of Seawater pHT with an Automated Apparatus using a Flow Cell in a Closed Circuit (Shu Saito, Masao Ishii, Takashi Midorikawa and Hisayuki Y. Inoue, 2008)

第58号　栄養塩測定用海水組成標準の2006年国際共同実験報告（青山道夫，J. Barwell-Clarke, S. Becker, M. Blum, Braga E.S., S. C. Coverly, E. Czobik, I. Dahllöf, M. Dai, G. O Donnell, C. Engelke, Gwo-Ching Gong, Gi-Hoon Hong, D. J. Hydes, Ming-Ming Jin, 葛西広海，R. Kerouel, 清本容子，M. Knockaert, N. Kress, K. A. Krogslund, 熊谷正光，S. Leterme, Yarong Li, 増田真次，宮尾　孝，T. Moutin, 村田昌彦，永井直樹，G. Nausch, A. Nybakk, M. K. Ngirchechol, 小川浩史，J. van Ooijen, 太田秀和，J. Pan, C. Payne, O. Pierre-Duplessix, M. Pujo-Pay, T. Raabe, 齊藤一浩，佐藤憲一郎，C. Schmidt, M. Schuett, T. M. Shammon, J. Sun, T. Tanhua, L. White, E.M.S. Woodward, P. Worsfold, P. Yeats, 芳村　毅，A. Youénou, Jia-Zhong Zhang, 2008）
2006 Inter-laboratory Comparison Study for Reference Material for Nutrients in Seawater (M. Aoyama, J. Barwell-Clarke, S. Becker, M. Blum, Braga E. S., S. C. Coverly, E. Czobik, I. Dahllöf, M. H. Dai, G. O. Donnell, C. Engelke, G. C. Gong, Gi-Hoon Hong, D. J. Hydes, M. M. Jin, H. Kasai, R. Kerouel, Y. Kiyomono, M. Knockaert, N. Kress, K. A. Krogslund, M. Kumagai, S. Leterme, Yarong Li, S. Masuda, T. Miyao, T. Moutin, A. Murata, N. Nagai, G. Nausch, M. K. Ngirchechol, A. Nybakk, H. Ogawa, J. van Ooijen, H. Ota, J. M. Pan, C. Payne, O. Pierre-Duplessix, M. Pujo-Pay, T. Raabe, K. Saito, K. Sato, C. Schmidt, M. Schuett, T. M. Shammon, J. Sun, T. Tanhua, L. White, E.M.S. Woodward, P. Worsfold, P. Yeats, T. Yoshimura, A.

Youénou, J. Z. Zhang, 2008)

第59号　気象研究所共用海洋モデル（MRI.COM）第 3 版解説（辻野博之・本井達夫・石川一郎・平原幹俊・中野英之・山中吾郎・安田珠幾・石崎　廣（気象研究所海洋研究部），2010）
Reference manual for the Meteorological Research Institute Community Ocean Model (MRI.COM) Version 3 (Hiroyuki Tsujino, Tatsuo Motoi, Ichiro Ishikawa, Mikitoshi Hirabara, Hideyuki Nakano, Goro Yamanaka, Tamaki Yasuda, and Hiroshi Ishizaki (Oceanographic Research Department), 2010)

第60号　栄養塩測定用海水組成標準の2008年国際共同実験報告（青山道夫，Carol Anstey, Janet Barwell-Clarke, François Baurand, Susan Becker, Marguerite Blum, Stephen C. Coverly, Edward Czobik, Florence D'amico, Ingela Dahllöf, Minhan Dai, Judy Dobson, Magali Duval, Clemens Engelke, Gwo-Ching Gong, Olivier Grosso, 平山篤史，井上博敬，石田雄三，David J. Hydes, 葛西広海，Roger Kerouel, Marc Knockaert, Nurit Kress, Katherine A. Krogslund, 熊谷正光，Sophie C. Leterme, Claire Mahaffey, 光田　均，Pascal Morin, Thierry Moutin, Dominique Munaron, 村田昌彦，Günther Nausch, 小川浩史，Jan van Ooijen, Jianming Pan, Georges Paradis, Chris Payne, Olivier Pierre-Duplessix, Gary Prove, Patrick Raimbault, Malcolm Rose, 齊藤一浩，斉藤宏明，佐藤憲一郎，Cristopher Schmidt, Monika Schütt, Theresa M. Shammon, Solveig Olafsdottir, Jun Sun, Toste Tanhua, Sieglinde Weigelt-Krenz, Linda White, E. Malcolm. S. Woodward, Paul Worsfold, 芳村　毅，Agnès Youénou, Jia-Zhong Zhang, 2010）
2008 Inter-laboratory Comparison Study of a Reference Material for Nutrients in Seawater（青山道夫，Carol Anstey, Janet Barwell-Clarke, François Baurand, Susan Becker, Marguerite Blum, Stephen C. Coverly, Edward Czobik, Florence D'amico, Ingela Dahllöf, Minhan Dai, Judy Dobson, Magali Duval, Clemens Engelke, Gwo-Ching Gong, Olivier Grosso, 平山篤史，井上博敬，石田雄三，David J. Hydes, 葛西広海，Roger Kerouel, Marc Knockaert, Nurit Kress, Katherine A. Krogslund, 熊谷正光，Sophie C. Leterme, Claire Mahaffey, 光田　均，Pascal Morin, Thierry Moutin, Dominique Munaron, 村田昌彦，Günther Nausch, 小川浩史，Jan van Ooijen, Jianming Pan, Georges Paradis, Chris Payne, Olivier Pierre-Duplessix, Gary Prove, Patrick Raimbault, Malcolm Rose, 齊藤一浩，斉藤宏明，佐藤憲一郎，Cristopher Schmidt, Monika Schütt, Theresa M. Shammon, Solveig Olafsdottir, Jun Sun, Toste Tanhua, Sieglinde Weigelt-Krenz, Linda White, E. Malcolm. S. Woodward, Paul Worsfold, 芳村　毅，Agnès Youénou, Jia-Zhong Zhang, 2010)

第61号　強雨をもたらす線状降水帯の形成機構等の解明及び降水強度・移動速度の予測に関する研究（大阪管区気象台・彦根地方気象台・京都地方気象台・奈良地方気象台・和歌山地方気象台・神戸海洋気象台・松江地方気象台・鳥取地方気象台・舞鶴海洋気象台・広島地方気象台・徳島地方気象台・予報研究部，2010）
Studies on formation process of line-shaped rainfall systems and predictability of rainfall intensity and moving speed (Osaka District Meteorological Observatory, Hikone Local Meteorological Observatory, Kyoto Local Meteorological Observatory, Nara Local Meteorological Observatory, Wakayama Local Meteorological Observatory, Kobe Marine Observatory, Matsue Local Meteorological Observatory, Tottori Local Meteorological Observatory, Maizuru Marine Observatory, Hiroshima Local Meteorological Observatory, Tokushima Local Meteorological Observatory AND Forecast Research Department, 2010)

第62号　WWRP 北京オリンピック2008予報実証 / 研究開発プロジェクト（齊藤和雄・國井　勝・原昌　弘・瀬古　弘・原旅人・山口宗彦・三好建正・黄　偉健，2010）
WWRP Beijing Olympics 2008 Forecast Demonstration/Research and Development Project (B08FDP/RDP) (Kazuo Saito, Masaru Kunii, Masahiro Hara, Hiromu Seko, Tabito Hara, Munehiko Yamaguchi, Takemasa Miyoshi and Wai-kin Wong, 2010)

第63号　東海地震の予測精度向上及び東南海・南海地震の発生準備過程の研究（地震火山研究部，2011）
Improvement in prediction accuracy for the Tokai earthquake and research of the preparation process of the Tonankai and the Nankai earthquakes (Seismology and Volcanology Research Department, 2011)

第64号　気象研究所地球システムモデル第 1 版（MRI-ESM1）－モデルの記述－（行本誠史・吉村裕正・保坂征宏・坂見智法・辻野博之・平原幹俊・田中泰宙・出牛　真・小畑　淳・中野英之・足立恭将・新藤永樹・鰺　将吉・尾瀬智昭・鬼頭昭雄，2011）
Meteorological Research Institute-Earth System Model Version 1 (MRI-ESM1) − Model Description − (Seiji Yukimoto, Hiromasa Yoshimura, Masahiro Hosaka, Tomonori Sakami, Hiroyuki Tsujino, Mikitoshi Hirabara, Taichu Y. Tanaka, Makoto Deushi, Atsushi Obata, Hideyuki Nakano, Yukimasa Adachi, Eiki Shindo, Shoukichi Yabu, Tomoaki Ose and Akio Kitoh, 2011)

第65号　東南アジア地域の気象災害軽減国際共同研究（斉藤和雄，黒田　徹，林　修吾，瀬古　弘，國井　勝，小司禎教，上野　充，川畑拓矢，余田成男，大塚成徳，Nurjanna Joko Trilaksono, 許　智揚，古関俊也，Le Duc, Kieu Thi Xin, 黄　偉健，Krushna Chandra Gouda, 2011）
International Research for Prevention and Mitigation of Meteorological Disasters in Southeast Asia (Kazuo Saito, Tohru Kuroda, Syugo Hayashi, Hiromu Seko, Masaru Kunii, Yoshinori Shoji, Mitsuru Ueno, Takuya Kawabata, Shigeo Yoden, Shigenori Otsuka, Nurjanna Joko Trilaksono, Tieh-Yong Koh, Syunya Koseki, Le Duc, Kieu Thi Xin, Wai-Kin Wong and Krushna Chandra Gouda, 2011)

第66号　太平洋における大気－海洋間二酸化炭素フラックス推定手法（杉本裕之・平石直孝・石井雅男・緑川　貴，2012）
A method for estimating the sea-air CO2 flux in the Pacific Ocean (Hiroyuki Sugimoto, Naotaka Hiraishi, Masao Ishii and Takashi Midorikawa, 2012)

第67号　太平洋における大気－海洋間二酸化炭素フラックス推定手法（坪井一寛・松枝秀和・澤　庸介・丹羽洋介・中村雅道・久保池大輔・岩坪昇平・齊藤和幸・花宮義和・辻健太郎・大森英裕・西　秀紘，2012）
Development of a flask sampling and its high-precision measuring system for greenhouse gases observations using a cargo aircraft C-130H (Kazuhiro Tsuboi, Hidekazu Matsueda, Yousuke Sawa, Yosuke Niwa Masamichi Nakamura, Daisuke

Kuboike, Shohei Iwatsubo, Kazuyuki Saito Yoshikazu Hanamiya, Kentaro Tsuji, Hidehiro Ohmori, Hidehiro Nishi, 2012)

第68号　国際シンポジウム　電子顕微鏡を用いたエアロゾル研究（五十嵐康人，Weijun Li, Peter. R. Buseck, 岡田菊雄，張代洲，足立光司，藤谷雄二，嶋寺　光，五藤大輔，三井千珠，野島　雅，大島　長，松井仁志，石元裕史，松木　篤，Pradeep Khatri, 中山智喜，向井将平，大石乾詞，間山憲仁，坂本哲夫，直江寛明，財前祐二，塩流水洋樹，田中泰宙，梶野瑞王，2013）

International Symposium on Aerosol Studies Explored by Electron Microscopy (Yasuhito Igarashi, Weijun Li, Peter. R. Buseck, Kikuo Okada, Daizhou Zhang, Kouji Adachi, Yuji Fujitani, Hikari Shimadera, Daisuke Goto, Chizu Mitsui, Masashi Nojima, Naga Oshima, Hitoshi Matsui, Hiroshi Ishimoto, Atsushi Matsuki, Pradeep Khatri, Tomoki Nakayama, Shohei Mukai, Kenji Ohishi, Norihito Mayama, Tetsuo Sakamoto, Hiroaki Naoe, Yuji Zaizen, Hiroki Shiozuru, Taichu Y. Tanaka and Mizuo Kajino, 2013)

第69号　マグマ活動の定量的把握技術の開発とそれに基づく火山活動度判定の高度化に関する研究（地震火山研究部，2013）

Development of Quantitative Detection Techniques of Magma Activity and Improvement of Evaluation of Volcanic Activity Level (Seismology and Volcanology Research Department, MRI, 2013)

第70号　平成23年（2011年）東北地方太平洋沖地震による津波高の現地調査報告（林　豊・前田憲二・対馬弘晃・岡田正實・木村一洋・岩切一宏，2013）

Reports on Field Surveys of Tsunami Heights from the 2011 off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake (Yutaka Hayashi, Kenji Maeda, Hiroaki Tsushima, Masami Okada, Kazuhiro Kimura and Kazuhiro Iwakiri, 2013)

第71号　気候研究のための気象研究所アンサンブル予測システムの概要とその応用（藪　将吉・水田　亮・吉村裕正・黒田友二・向川　均，2014）

Meteorological Research Institute Ensemble Prediction System (MRI-EPS) for climate research - Outline and its applications – (Shoukichi Yabu, Ryo Mizuta, Hiromasa Yoshimura, Yuhji Kuroda, and Hitoshi Mukougawa, 2014)

第72号　日本各地域の繰り返し相似地震発生状況に関する研究（地震火山研究部・地震火山部・気象大学校・札幌管区気象台・仙台管区気象台・大阪管区気象台・福岡管区気象台・沖縄気象台，2014）

Survey of moderate repeating earthquakes in Japan (Seismology and Volcanology Research Department of MRI, Seismology and Volcanology Department, Meteorological College, Sapporo Regional Headquarters, Sendai Regional Headquarters, Osaka Regional Headquarters, Fukuoka Regional Headquarters, and Okinawa Regional Headquarters, 2014)

第73号　気象研究所非静力学地域気候モデルによる日本付近の将来気候変化予測について（佐々木秀孝・村田昭彦・川瀬宏明・花房瑞樹・野坂真也・大泉三津夫・水田亮・青柳曉典・志藤文武・石原幸司，2015）

Projection of Future Climate Change around Japan by using MRI Non-hydrostatic Regional Climate Model (Hidetaka Sasaki, Akihiko Murata, Hiroaki Kawase, Mizuki Hanafusa, Masaya Nosaka,Mitsuo Oh'izumi, Ryou Mizuta, Toshinori Aoyagi, Fumitake Shido, and Koji Ishihara, 2015)

気　象　研　究　所

1946（昭和21）年　設　立

所　　長：永　田　　雅
研究総務官：蒲　地　政　文
研究調整官：竹　内　義　明

予　報　研　究　部　　部長：理博　齊　藤　和　雄
気　候　研　究　部　　部長：理博　尾　瀬　智　昭
台　風　研　究　部　　部長：　　高　野　　功
環境・応用気象研究部　　部長：理博　高　藪　　出
気象衛星・観測システム研究部　　部長：理博　角　村　　悟
地　震　津　波　研　究　部　　部長：理博　前　田　憲　二
火　山　研　究　部　　部長：理博　山　里　　平
海洋・地球化学研究部　　部長：理博　倉賀野　　連

気　象　研　究　所　技　術　報　告

編集委員長：尾　瀬　智　昭

編集委員：益　子　　渉　　石　井　正　好　　沢　田　雅　洋
出　牛　　真　　泉　　敏　治　　木　村　一　洋
高　木　朗　充　　中　野　英　之
事務局：斉　藤　貞　夫　　小　野　景　子

気象研究所技術報告は，1978（昭和53）年の初刊以来,気象研究所が必要の都度発行する刊行物であり,気象研究所の研究計画に基づき実施した研究に関する手法、データ、結果等についてのまとめ、または、すでに公表した研究論文類をとりまとめ総合的報告としたものを掲載する。

本紙に掲載された報告の著作権は気象研究所に帰属する。本紙に掲載された報告を引用する場合は,出所を明示すれば気象研究所の許諾を必要としない。本紙に掲載された報告の全部又は一部を複製，転載，翻訳，あるいはその他に利用する場合は気象研究所の許諾を得なければならない。個人が研究，学習，教育に使用する場合は,出所を明示すれば気象研究所の許諾を必要としない。

気　象　研　究　所　技　術　報　告
第　74　号
平成27年10月　発行
編集兼
発行者　気　象　研　究　所
〒305-0052　茨城県つくば市長峰１－１
TEL(029)853-8535